

Nuevos datos de tráfico en autopista con límites de velocidad variable

New data on traffic in highways with variable speed limits

Francesc SORIGUERA

*Profesor Lector. CENIT (Centro de Innovación del Transporte)
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos de Barcelona. UPC (08034 Barcelona)*

Marcel SALA

*Investigador predoctoral. CENIT (Centro de Innovación del Transporte)
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos de Barcelona. UPC*

Irene MARTÍNEZ

*Investigadora asociada. CENIT (Centro de Innovación del Transporte)
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos de Barcelona. UPC*

RESUMEN

Este artículo presenta el experimento con Límites de Velocidad Variable (DSL) que se realizó en Junio de 2013 en la autopista B-23 de acceso a Barcelona. El sistema DSL instalado en esta autopista, así como la alta densidad de equipamiento de monitorización disponible, hicieron de este un tramo adecuado para establecer un "highway lab", un laboratorio de tráfico a escala real. El objetivo de este experimento es construir una completa base de datos de tráfico bajo distintos límites de velocidad, que permita avanzar en el conocimiento de esta estrategia de gestión activa del tráfico. Se tomaron medidas detalladas del contaje de vehículos, velocidad, ocupación, cambios de carril y tiempos de viaje. Todas las mediciones, provenientes de distintos equipos, han sido agrupadas en una única base de datos, disponible para la comunidad científica⁰. El artículo describe el experimento y presenta algunos resultados preliminares.

PALABRAS CLAVE: Velocidad, Tráfico, Autopista, Congestión, Límite de velocidad variable, Base de datos empírica, Barcelona.

ABSTRACT

This paper presents the Dynamic Speed Limit (DSL) experiment that took place in June 2013 on the last 13 km stretch of B-23 freeway accessing Barcelona. The DSL system installed on that freeway in addition to the high density of surveillance equipment available makes this stretch a suitable highway lab. The objective of the experiment was to construct a comprehensive database when different speed limits apply. Detailed measurements of speed, vehicle count, occupancy, lane changing activity and travel time were taken. These simultaneous measurements obtained from very different types of monitoring equipment have been grouped into a single database. This comprehensive DSL database, unique in its nature, is made publicly available to the whole research community⁰. The paper describes in detail the experiment and presents some preliminary results.

KEY WORDS: Speed, Traffic, Highway, Congestion, Variable speed limit, Empirical database, Barcelona.

Introducción y antecedentes

El control del tráfico en autopistas mediante la *gestión variable del límite de velocidad (DSL)* fue introducida a principios de la década de 1970 en Alemania^(II) y una década más tarde en Holanda^(XIV). Actualmente la estrategia DSL es una herramienta habitual de gestión del tráfico, con muchas implementaciones en autopistas metropolitanas en Europa y América^(IV-VI).

A pesar de su comienzo tardío, actualmente la ciudad de Barcelona se encuentra entre las pioneras en relación a las implementaciones a gran escala de los sistemas DSL, con más de 100 km de autopista controlados. Todo empezó en julio de 2007, cuando el Gobierno Catalán aprobó un plan de 73 medidas para mejorar la calidad del aire en la región metropolitana de Barcelona. El plan incluía la inmediata reducción de los límites de velocidad en las principales autopistas de acceso a la ciudad a 80 km/h (desde los 120 km/h previos).

Este era solo el primer paso hacia a la implementación generalizada de un sistema DSL. El objetivo era adaptar en cada momento los límites de velocidad de las autopistas en función de las condiciones imperantes de tráfico y contaminación, manteniendo la velocidad máxima de 80 km/h. El sistema DSL empezó a funcionar en enero de 2009, en un corredor de prueba. Dos años más tarde, en enero de 2011, la velocidad límite máxima fue incrementada hasta 100 km/h debido a la demanda popular y para mantener la promesa electoral del nuevo gobierno entrante en Cataluña. Desde entonces el sistema se ha expandido a más corredores y se espera que pueda ser completado durante el año 2015.

A pesar de su expansión y popularidad internacional los efectos de las estrategias DSL aún no son bien conocidos. Los beneficios que se reivindican habitualmente implican reducciones en la emisión de contaminantes^(VII-IX) y de la tasa de accidentalidad^(X-XII), así como un alivio de la congestión^(XIII-XV). Este último aspecto es el que genera una mayor controversia.

Desde el punto de vista de las operaciones de tráfico, se distinguen dos tipos de estrategias DSL en la literatura^(XVI). La primera está basada en un fenómeno llamado *efecto de homogenización*, mientras que la segunda intenta prevenir la *rotura del tráfico* (i.e. el "traffic breakdown" en terminología anglosajona, refiriéndose a la pérdida de continuidad y estabilidad del tráfico al entrar en regímenes de cola).

Las estrategias de homogenización se basan en la creencia de que imponiendo límites de velocidad bajos se reducen las diferencias de flujo, ocupación y velocidad entre carriles y también a nivel vehicular (i.e. dentro del mismo carril). Los datos empíricos disponibles (ver Tabla 1) sugieren que realmente existe cierta homogenización debido a DSL. Estas estrategias imponen límites de velocidad alrededor de la velocidad crítica (i.e. la velocidad observada en capacidad; habitualmente entorno a los 70-90 km/h). Los efectos son más claros para límites de velocidad de unos 80 km/h^(XVII), aunque probablemente este valor dependa del lugar concreto del experimento.

Se ha demostrado que los beneficios que se obtienen de una velocidad de circulación reducida y homogénea pueden llevar a una reducción en un 20-30% del índice de accidentes de tráfico^(X-XII), y reducciones de 4-6% de las emisiones durante periodos libres^(VIII-IX).

Fuente (Referencia)	Rango DSL [km/h]	Cumplimiento	Velocidad libre ^(a)	Densidad crítica	Capacidad	Homogeneización
(II) Zackor (1972)	80	Elevado	↓	-	↑ 5-10% ^(b)	↓ Diferencias de velocidad ^(c)
(XIV) Smulders (1990)	90-70	Bajo (no obligatorio)	↓ Leve (0-5%)	↑ Leve	↑ 1-2%	↓ Varianza del espaciado y del intervalo ^(d)
(XVIII) Van den Hoogen & Smulders (1994)	90-70	Elevado	↓	↑	Ningún efecto	↓ Diferencias en flujo, ocupación y velocidad ^(c)
(XVII) Papageorgiou et al. (2008)	96-64	Períodos de límite recomendado y períodos en los que es obligatorio	↓	↑	Poco concluyente	-
(XXI) Knoop et al. (2010)	100-60	Bajo	-	-	↑ Carril lento	↓ Diferencias de flujo entre carriles
(XX) Heydecker & Addison (2011)	96-80	Elevado (obligatoriedad por radar)	↑↓ ^(e)	↓	↑ Carriles central y lento	-
(XXII) Duret et al. (2012)	110	Elevado	-	-	↑ Carril lento	↓ Diferencias de flujo entre carriles

(a) Se refiere a la velocidad media para ocupaciones sub-críticas. Una reducción de la velocidad libre implica una mayor ocupación para mantener el mismo flujo.

(b) Cremer^(XVII) propone un modelo cuantitativo para el diagrama fundamental basado en estos datos, consiguiendo un aumento de 13% de la capacidad.

(c) Tanto para vehículos individuales como entre carriles (intra e inter-carril).

(d) No se observó ninguna diferencia considerable de velocidades o distribuciones entre carriles.

(e) Dependiendo del carril considerado y del límite de velocidad que actuaba. No concluyente.

Tabla 1. Revisión bibliográfica: efectos empíricos de las estrategias de límite de velocidad variable.

Esta reducción podría ser mucho mayor si los DSL pudieran evitar la congestión, ya que las emisiones son mucho más elevadas en estados congestionados que en estados libres.

Los efectos de la homogeneización en el posible incremento de la capacidad suscitan mayores discusiones. Las investigaciones pioneras de los años 70^(ii, xiii) previeron un notable aumento de la capacidad (de hasta un 21%) como consecuencia de la homogeneización debida a DSL. Investigaciones posteriores^(xiv, xvii - xix) concluían que no se podía atribuir un aumento sistemático de la capacidad a la homogeneización y calificaron dichas previsiones como demasiado optimistas. Recientemente Heydecker^(xx) ha propuesto un análisis por carriles en lugar de observar las características del tráfico a nivel sección, con la intención de esclarecer los efectos de la homogeneización sobre la capacidad. Siguiendo estas recomendaciones las referencias (XXI) y (XXII) han demostrado un aumento en la utilización del carril lento debido a la homogeneización causada por la regulación del límite de velocidad. Dado que habitualmente este carril está infrutilizado, el uso de DSL podría aumentar la capacidad de la vía en ciertos contextos.

No obstante, hoy en día las expectativas de que los DSL se conviertan en una estrategia con efectos significativos para la eficiencia de las autopistas se basan en su capacidad para restringir el flujo troncal. El concepto es simple: restringiendo el ritmo de llegada de vehículos al cuello de botella se puede prevenir la rotura del tráfico y la consiguiente pérdida de capacidad (i.e. el conocido "capacity drop" que representa aproximadamente un 10% de la capacidad en regímenes libres^(xxiii)).

Dos tipos de estrategias desarrollan esta idea. La primera, el algoritmo SPECIALIST^(xxiv), desarrollado y ensayado con éxito en Holanda^(xxv) y que se basa en el hecho que al reducir el límite de velocidad, se sirve el mismo flujo con una ocupación mayor. Durante la transición hacia esta mayor ocupación hay una reducción temporal del flujo para satisfacer la ley de conservación de vehículos. Esta reducción temporal del flujo se utiliza en el SPECIALIST para eliminar las colas creadas por inestabilidades del tráfico que surgen espontáneamente a densidades muy elevadas y recuperar de esta manera la capacidad de la vía. Sin embargo esta estrategia no sirve para eliminar las colas causadas en cuellos de botella, donde se reduce la capacidad significativamente, como por ejemplo en los enlaces.

Para actuar en estas últimas situaciones sería necesaria una reducción de flujo mayor y permanente. Esto es lo que se pretende con el segundo tipo de estrategias^(xxvi, xxvii), en las que se asume que el DSL se puede utilizar como un regulador del flujo troncal, imponiendo límites de velocidad muy bajos (i.e. claramente sub-críticos, inferiores a 70 km/h). Esta estrategia combinada con el control del flujo en los accesos (i.e. "ramp metering") puede crear la restricción de flujo permanente que se necesita para evitar la creación de la cola en los puntos críticos.

A conocimiento de los autores, no se han llevado a cabo experimentos reales en relación a este segundo tipo de estrategias. De hecho,

no hay resultados que demuestren empíricamente los efectos sobre el tráfico de un límite de velocidad por debajo de la velocidad crítica. Los trabajos referenciados asumen una reducción significativa del flujo al imponer límites de velocidad sub-críticos, pero sus evidencias se limitan a conjeturas e hipótesis. El presente artículo demuestra empíricamente que esta restricción permanente del flujo no se produce ni para límites de velocidad muy bajos (i.e. 50 km/h), al menos en la sección analizada.

Los efectos sobre la capacidad o la propiedad de restringir el flujo no son las únicas cuestiones en relación a las estrategias DSL que aún requieren más investigación. Por ejemplo algunos trabajos sugieren que los cambios de carril en condiciones de tráfico muy denso pueden restringir el tráfico y empeorar la congestión existente. Los cambios de carril se han asociado a fenómenos como la pérdida de capacidad^(xxviii - xxx) o las oscilaciones del tráfico^(xxx, xxxi). El recíproco también es cierto: la ausencia de cambios de carril se ha asociado a una suavización del tráfico^(xxxii), como se demostró empíricamente al observar que la activación de carriles VAO puede disminuir el número de cambios de carril y suavizar el tráfico, aumentando la capacidad del cuello de botella incluso para los carriles normales adyacentes^(xxxiii).

Dados estos resultados se podría esperar que cualquier estrategia que reduzca el número de cambios de carril pudiera aumentar la capacidad. Con este objetivo es interesante conocer en qué circunstancias la homogeneización debida a DSL reduce el número de cambios de carril.

La mayor dificultad para responder de manera concluyente a las preguntas formuladas es el disponer de una base de datos adecuada. Generalmente los datos se obtienen en un corredor de prueba con una estrategia de control DSL específica, donde se activan diferentes límites de velocidad para diferentes condiciones de tráfico. Esto implica que los datos recogidos durante un límite de velocidad concreto no cubran toda la gama de posibles estados de tráfico, limitando las conclusiones a las que se puede llegar.

Con el fin de comprender los efectos fundamentales de los límites de velocidad en un flujo de tráfico en autopista, se necesitan datos detallados [ver Tabla 2]. Datos del vehículo individual, sin ningún tipo de agregación, de forma que sea posible calcular la homogeneidad de velocidades dentro del flujo de tráfico. También debe de ser posible el conteo del número de cambios de carril. Además las mediciones deben ser obtenidas en un contexto de demanda similar y bajo configuraciones de límites de velocidad claros y distintos.

Probablemente la única manera de obtener estos datos es ejecutando un experimento específico en una autopista real, con la posibilidad de cambiar radicalmente los límites de velocidad de un día para el otro, y estableciendo de forma específica los diferentes escenarios necesarios para el análisis. Hay pocas autopistas en el mundo capaces de cambiar de forma dinámica los límites de velocidad y suficientemente equipadas con la tecnología de monitorización necesaria para medir estos datos detallados. Y lo que es

Problemática		Descripción	Requisitos del experimento
Cumplimiento de los conductores		<ul style="list-style-type: none"> • ¿Los conductores cumplen con los DSL? (en particular cuando los límites son bajos y la densidad del tráfico es moderada o baja). • ¿Cuál es el efecto de los radares en el cumplimiento de los conductores? 	<ul style="list-style-type: none"> • Es conveniente buscar altas tasas de cumplimiento. De lo contrario, la única conclusión será la falta de cumplimiento. Por lo tanto las secciones con radar son las deseables para un análisis detallado.
Efectos Macro	Capacidad del cuello de botella	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Pueden los límites de velocidad tener un efecto positivo en la capacidad del cuello de botella? ¿Cuándo? • ¿Pueden los límites de velocidad atenuar el fenómeno del "capacity drop" en la transición a flujo congestionado? (es decir, estabilizar el flujo máximo). • ¿Pueden los límites de velocidad atenuar el comportamiento de incremento y caída de los flujos de descarga del cuello de botella? 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario tomar medidas aguas arriba del cuello de botella (tráfico congestionado) y aguas abajo del mismo (tráfico en flujo libre). • Se debe abarcar desde la creación de la congestión hasta su disolución (esto es todo el periodo punta).
	Control del tronco ("mainline metering")	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Pueden límites de velocidad bajos crear un cuello de botella artificial? (de tal forma que el flujo del tronco pueda ser regulado usando los límites de velocidad). 	<ul style="list-style-type: none"> • Crear contextos donde el límite de velocidad se convierta en un cuello de botella activo (imponer un límite de velocidad muy estricto en secciones fluyendo cerca de la capacidad).
	Diagrama fundamental y propagación de colas	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Cómo evoluciona la relación flujo-densidad bajo distintos límites de velocidad? • ¿Cómo afecta esto a la evolución de la cola? (velocidades de las ondas de choque). 	<ul style="list-style-type: none"> • Se deben planificar límites de velocidad para que se produzcan la mayoría de los escenarios de velocidad-ocupación.
Causa Micro	Distribución de velocidad de los vehículos	<ul style="list-style-type: none"> • ¿La distribución de velocidades a nivel vehicular se ve modificada por los distintos límites de velocidad? (en el mismo carril y entre carriles). • ¿Se reduce la varianza de la velocidad para algunas limitaciones de velocidad? (homogenización de la velocidad). 	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesitan datos vehículo a vehículo.
	Atenuación del "stop & go"	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Pueden los límites de velocidad atenuar el fenómeno de "stop & go"? • En el caso de que exista ¿Esta atenuación incrementa o disminuye la tasa de descarga de la cola? 	
	Diferencias de ocupación entre carriles	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Pueden los límites de velocidad homogeneizar la ocupación de varios carriles? 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar secciones cerca de entradas o salidas, donde la ocupación del carril se ve afectada por los trenzados.
	Actividad de cambio de carril	<ul style="list-style-type: none"> • ¿Pueden los límites de velocidad reducir el número de cambios de carril? 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar secciones donde se producen cambios de carril obligatorios cerca de las entradas y salidas. • La calidad de la grabación de video deber ser suficiente para contar el número de cambios de carril.

Tabla 2. Preguntas a responder en relación a las estrategias de limitación variable de velocidad.

peor, hay incluso menos administraciones de tráfico suficientemente comprometidas con las necesidades de investigación de la comunidad científica que permitan tales experimentos en las autopistas que gestionan y durante los episodios de mayor demanda.

Todo lo anterior se ha logrado en la autopista B-23, de acceso a la ciudad de Barcelona desde el suroeste. Este corredor está muy demandado, con congestión recurrente diaria durante la hora punta de la mañana. El tramo seleccionado incluye los últimos 13 kilómetros de acceso a la ciudad, donde hay instalado un sistema DSL, con señales de velocidad variable cada 0,5 - 1 kilómetros. La monitorización de la autopista incluye detectores de tráfico cada 0,5 km (en promedio), cámaras de televisión cada kilómetro y un sistema de reconocimiento de matrículas (LPR) en ambos extremos del tramo. Y lo que es más importante, el Servei Català del Trànsit (SCT, la adminis-

tración del tráfico en Catalunya) facilitó el experimento. Todo esto hace que la autopista B-23 sea un laboratorio de tráfico ideal (ver Foto 1).

El objetivo del presente trabajo es presentar en detalle dicho experimento y ayudar a la difusión de la base de datos resultante⁶. Esto permitirá que la comunidad científica pueda hacer uso de una base de datos de tráfico en autopista completa y única en diferentes escenarios de límite de velocidad. El análisis inteligente de estos datos debería conducir a un avance fundamental en el conocimiento de los efectos de DSL y sus causas.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera:

- En el siguiente apartado se presenta el tramo de autopista donde se llevó a cabo el experimento. Esto incluye su ubicación geográfi-

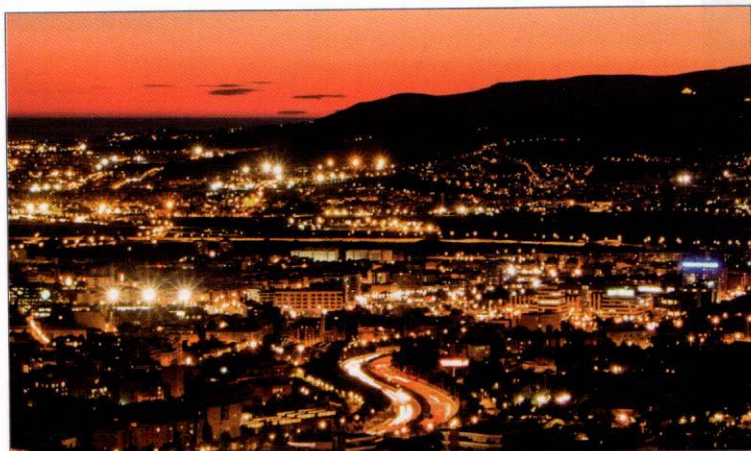


Foto 1. Vista nocturna de una parte del tramo de la autopista B-23 donde se hizo el experimento.

ca, la descripción física y también el patrón de la demanda de tráfico en un día laborable típico y durante la hora punta de la mañana.

- A continuación se presenta el sistema DSL, junto con la descripción de todo el equipo tecnológico instalado en el tramo.
- El apartado siguiente está dedicado al diseño del experimento DSL, incluyendo sus objetivos, requerimientos y limitaciones.
- Posteriormente se presenta la metodología del tratamiento de datos y un resumen de los resultados obtenidos.
- Por último, en la parte final se exponen algunas conclusiones y directrices para la investigación futura.

Descripción del tramo y demanda de tráfico

El experimento DSL tuvo lugar durante las primeras tres semanas de junio de 2013 en los últimos 13 kilómetros de la autopista B-23 dirección Barcelona (ver Figura 1 y Foto 2). Esta es una de las principales autopistas que dan acceso a la ciudad, con congestión diaria recurrente en la hora punta de la mañana (de 7:00 a 10:00 am).

En un día laborable típico, los tiempos de viaje pico pueden exceder más de 3 veces el tiempo de viaje libre, que es aproximadamente de 7 minutos ("Travel Time Index" > 3,

ver Figura 2). La demanda total agregada en el periodo de 7 a 10 am es de casi 170.000 veh-km para todo el tramo del experimento. La Figura 3 muestra la demanda acumulada de tráfico en cada detector durante un día laborable típico en hora punta de la mañana.

La importancia del enlace que conecta las autopistas B-23 y A-2 (Ronda Litoral de Barcelona; pks 7,28 – 6,15) es evidente. En este tramo hay tres de los cuellos de botella principales. Esto se puede observar en la Figura 4, reparando en las tres zonas con una elevada ocupación media:

- El primer cuello de botella (pk 7,28) se debe a la congestión del ramal de salida en el enlace de autopistas anteriormente señalado.
- El segundo (pk 3,57) también es un cuello de botella causado por un ramal de salida con cola que desborda al tronco de la autopista (i.e. este tipo de cuellos de botella se conocen con el nombre de "diverging bottlenecks").
- Por último, el tercero es causado por el final de la autopista en un semáforo cuando esta entra a Barcelona y entronca con la Avenida Diagonal, conjuntamente con un "diverging bottleneck" en el pk 1,10, donde la B-23 enlaza con la Ronda de Dalt de la ciudad de Barcelona.

La Figura 5 muestra un "contour plot" de las velocidades donde las zonas espacio – tiempo congestionadas son claramente identificables.



Foto 2. Vista diurna del tramo de la autopista B-23 en el que se realizó la experimentación.

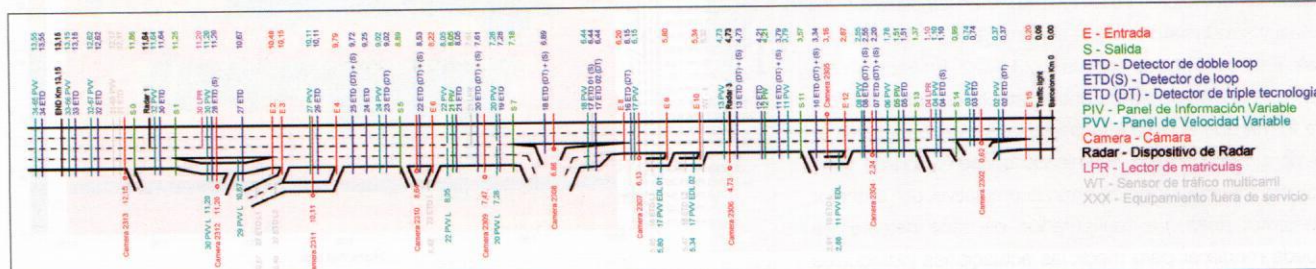


Figura 1. Esquema de instalaciones en el tramo experimental.

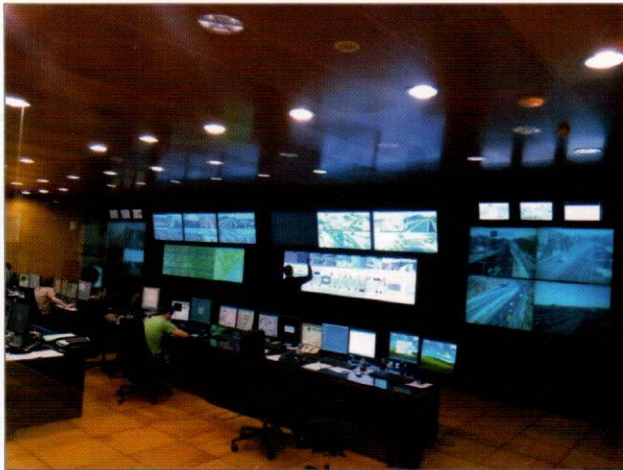


Foto 3. Todos los equipos utilizados en el experimento se controlan de forma remota desde el centro de control de tráfico.

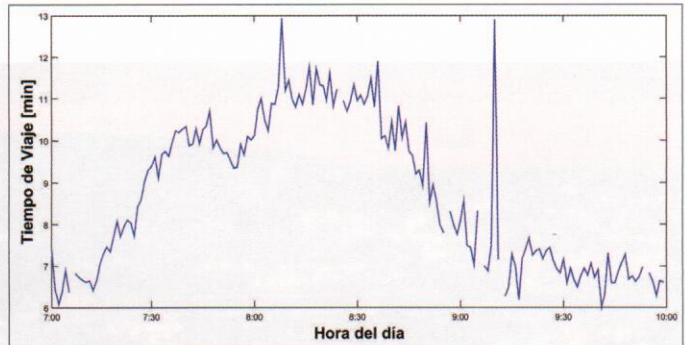


Figura 2. Tiempo de viaje medio en minutos para el tramo experimental en hora punta de mañana para un día laboral.

Sistema DSL y equipos de monitorización instalados

Los equipos de monitorización instalados y que funcionaron correctamente durante el transcurso del experimento se muestran en el esquema de instalaciones de la Figura 1. Todo el equipamiento se controla de forma remota desde el centro de control del tráfico (TMC, ver Foto 3). Esto incluye los detectores de tráfico, instalados aproximadamente cada 0,5 km, capaces de medir flujos, ocupaciones y velocidades.

Se dispone de varias tecnologías de detector: las espiras de inducción tradicionales, ya sean dobles o simples (llamadas ETD y ETD(S) respectivamente) y detectores no intrusivos (llamados detectores DT en el presente artículo) que obtienen sus mediciones de 3 tecnologías redundantes (ver Foto 4): radar "Doppler", ultrasonidos y detección por infrarrojos pasivos. Por defecto todos los tipos de detector calculan para cada carril y minuto el conteo [vehículos], la media temporal de la velocidad [km/h], correspondiente a la media aritmética de las velocidades individuales medidas durante el minuto, y la ocupación media del detector [%].

Todos los detectores están instalados en los carriles troncales, y solo la salida S7 y la entrada E8 están monitorizadas. Este es el enlace entre la B-23 y A-2. En general solo hay una entrada o salida entre detectores consecutivos, de forma que el flujo de entrada/salida se puede estimar de forma aproximada asumiendo conservación de vehículos y despreciando el error acumulativo del detector ("detector drift"). La configuración de cada detector se puede modificar para medir las actuaciones individuales de los vehículos (además de las medias de minuto).

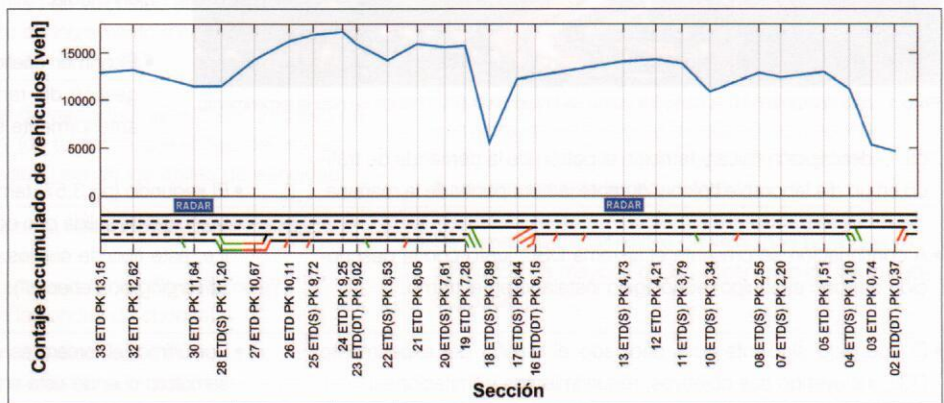


Figura 3. Demanda de tráfico acumulada en hora punta de mañana para un día laboral típico.

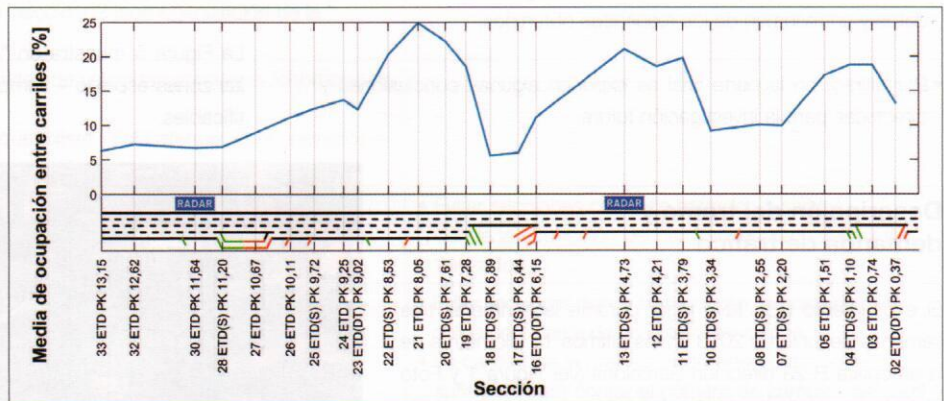


Figura 4. Ocupación media típica en hora punta de mañana para un día laboral.

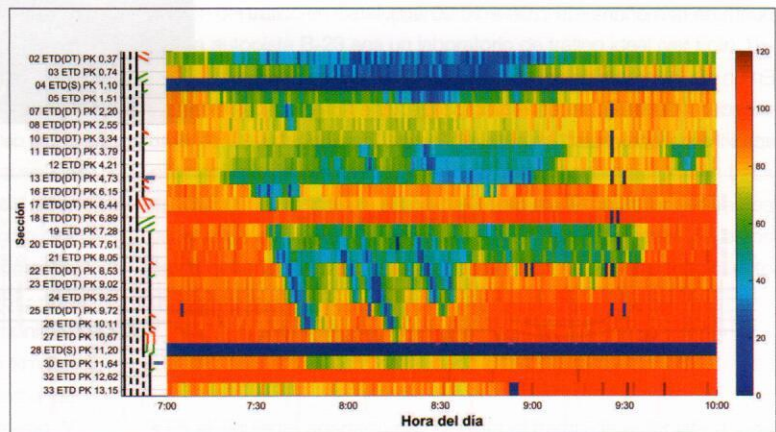


Figura 5. Gráfico de contorno de velocidades. Entre las 7 y 10 am del martes 4 de junio de 2013.



Foto 4. Distintos detectores no intrusivos (llamados detectores DT en el artículo) que obtienen sus mediciones de tres tecnologías redundantes: radar "Doppler", ultrasonidos y detección por infrarrojos pasivos.

El sistema de detectores se complementa con cámaras de TV, aproximadamente cada kilómetro. Los operadores del TMC usan las cámaras para obtener información visual directa en caso de incidencia, de gran ayuda para respaldar sus decisiones. El uso de las cámaras es completamente visual, sin ningún tipo de procesamiento automático de la imagen (Foto 5).

Finalmente el sistema de monitorización también incluye dos dispositivos de reconocimiento de matrículas (LPR) a los dos extremos del tramo del experimento. Los LPR solo están instalados en los dos carriles más rápidos. El sistema trata de aparear las matrículas leídas en las dos localizaciones con el objetivo de calcular los tiempos de viaje. Los resultados de estas mediciones se presentan como medias para cada minuto. Hay algunos minutos sin ningún emparejamiento, en este caso el tiempo de viaje es vacío. También pueden darse apareamientos incorrectos o vehículos que se desvían o paran entre los dispositivos LPR. Esto implica la existencia de valores atípicos en estos datos (ver Figura 2).

Todo este equipo de monitorización da soporte al sistema DSL de gestión dinámica del límite de velocidad. Cuando el sistema DSL está activo, cada 5 minutos se calculan unos límites de velocidad adecuados, que se muestran en las señales variables instaladas en los pórticos fijos (llamados PVV en el presente artículo, ver Foto 6). Hay una señal variable de velocidad máxima para cada carril, de forma que se pueden mostrar distintos límites de velocidad para distintos carriles. Sin embargo, por defecto, el algoritmo DSL instalado computa los límites de velocidad a nivel sección, es decir para todos los carriles.

La heurística detrás del algoritmo DSL es simple. Primero el corredor se divide en secciones. Cada sección está delimitada por una señal de limitación de velocidad variable a su inicio, con una longitud aproximada de 1 km. La velocidad límite mostrada en cada sección se calcula cada 5 minutos como el mínimo de los dos siguientes valores:

- La velocidad media medida por los detectores en la sección, redondeada a la baja hasta el múltiplo de 10 km/h más cercano.
- El límite de velocidad en la siguiente señal aguas abajo incrementado en un ratio de 10 km/h por kilómetro de separación.

Finalmente se tiene en cuenta que la velocidad mostrada no puede ser inferior a 40 km/h ni superior al límite máximo por dicha sección. El cumplimiento de estos límites de velocidad se controla utilizando unidades de radar en dos localizaciones en el tramo (ver Figura 1).

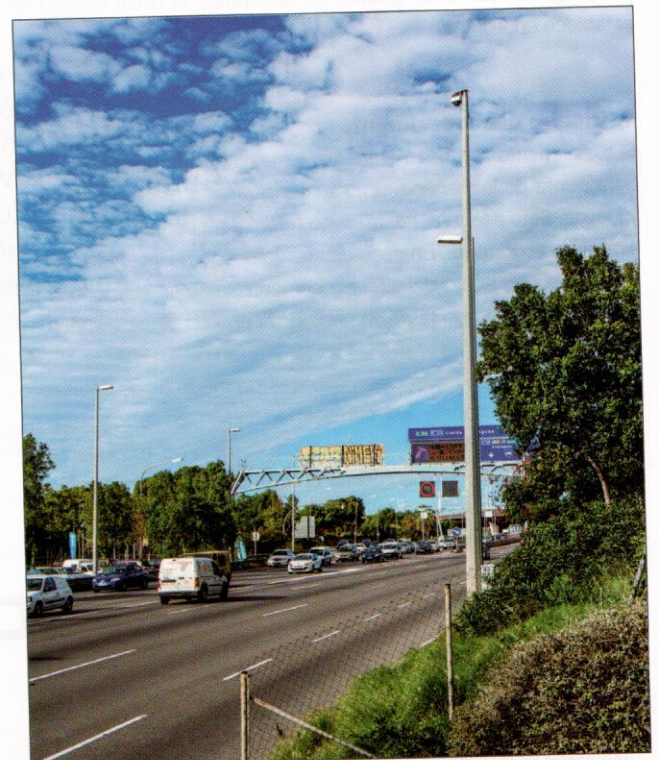


Foto 5. Último tramo de la autopista B-23 cuando entronca con la Avenida Diagonal. Se observa una cámara de TV en lo alto del poste.

El experimento

El experimento se diseñó para recoger los datos que permitan dar respuesta a las preguntas aún sin respuesta en relación a los efectos de las limitaciones de velocidad variable en autopista. En la Tabla 2 se resumen las preguntas de la investigación a abordar y los requerimientos que éstas imponen en el diseño del experimento.

Además existen otras limitaciones que afectan al diseño del experimento. La primera y más obvia es que siendo un experimento empírico, no se puede asegurar la misma demanda en los distintos escenarios analizados. Este problema resulta más grave en el tramo analizado debido a que los cuellos de botella predominantes son de tipo "diverging" y su capacidad depende de las demandas de salida en los enlaces.

Otras limitaciones se deben a las capacidades técnicas de los equipos en relación a los ajustes especiales. Por ejemplo, solo 3 cámaras de TV pueden grabar simultáneamente y solo 4 detectores pueden medir actuaciones individuales de forma simultánea. Esto impone unos condicionantes severos al diseño del experimento.

Finalmente el Servei Català del Trànsit impuso algunas limitaciones adicionales para no penalizar en exceso a los conductores. Esto incluye un límite mínimo de velocidad de 50 km/h en las secciones alejadas de los cuellos de botella y una longitud máxima de 5 km de aplicación de este límite. En las zonas del tramo de experimentación donde la congestión es recurrente, el límite mínimo se establece en 40 km/h.

1. Diseño del experimento

El experimento se realizó entre las 7 y las 10 am, cogiendo toda la hora punta de la mañana. Solo se consideraron martes, miércoles y jueves. Esto asegura, hasta cierto punto, una demanda de tráfico similar en el corredor. En caso de cualquier tipo de incidente aguas arriba o aguas abajo del sitio experimento, este se suspendió. La lluvia o el mal tiempo también implicaron abortar el experimento.

Las limitaciones en los equipos capaces de medir datos detallados de manera simultánea, así como la limitación en la longitud de autopista con límites de velocidad bajos, hicieron recomendable la división del tramo experimental en dos partes, la exterior (comprendiendo de 32 PVV hasta 22 PVV) y la interior (13 PVV hasta 4 PVV). Entre ellas existe una zona de transición. Para cada una de las partes se definieron los siguientes escenarios:

- Velocidad límite máxima. 100 km/h para la parte exterior (Day#2) y 80 km/h para la parte interior (Day#5).
- Velocidad límite mínima. 50 km/h para la parte exterior, la mayoría con régimen libre (Day#4) y 40 km/h para la parte interior, mayoritariamente congestionada (Day#7).



Foto 6. Detalle de los paneles de límite de velocidad variable (denominados PVV en el artículo).

- Velocidad límite media. Un escenario intermedio entre los anteriores. Esto es 80 km/h para la parte exterior (Day#3) y 60 km/h para la parte interior (Day#6).
- Límites de velocidad variable. Algoritmo del Servei Català del Trànsit (SCT) para todo el corredor experimental (Day#1).

Todos los detectores de tráfico fueron configurados para guardar las agregaciones de minuto del conteo de vehículos, ocupación y velocidad media. Adicionalmente, 4 de ellos fueron configurados para medir las actuaciones individuales. También se seleccionaron 3 cámaras para la grabación simultánea de alta calidad (30 fps y 536 x 400 píxeles) con el objetivo de contar los cambios de carril en su zona de cobertura. Estas selecciones se hicieron teniendo en cuenta que estas mediciones detalladas capturasen distintas condiciones de tráfico (flujo libre y congestionado).

Algunas de ellas deben estar cerca de los dispositivos de radar, de forma que el cumplimiento con los límites de velocidad sea mayor. Otras deben estar lejos del radar, para que puedan proporcionar datos que permitan valorar los efectos del control. Finalmente siempre que sea posible deben estar lejos de los enlaces, para evitar los cambios de carril obligatorios y los efectos de trenzado. El LPR se configuró para medir los tiempos medios de viaje por minuto.

La Tabla 3 resume los diferentes contextos de DSL y los equipamientos de monitorización sometidos a configuraciones especiales.

Durante el periodo del experimento los radares estaban activos, pero las multas no se tramitaron. No se dio información específica a los conductores sobre el experimento. El diseño del experimento cumplió con todas las restricciones anteriormente mencionadas.

Resultados del experimento

El experimento tuvo lugar durante el periodo de tiempo comprendido entre el 30 de mayo y el 19 de junio de 2013. La demanda total de tráfico en el corredor durante los siete días de experimento no se desvió más de un 0,9% en relación a la media.

1. Cumplimiento de los conductores con los DSL

La Figura 6 muestra que en general los límites de velocidad máximos se cumplen (a nivel sección). Sin embargo si solo se considera el carril rápido, el exceso de velocidad es notable. Además los resultados obtenidos en el experimento muestran que se produce un

incumplimiento generalizado cuando se aplican límites de velocidad por debajo de los máximos permitidos (Foto 7). En estas situaciones los límites de velocidad solo se cumplen de forma estricta en las secciones con radar.

Esto se observa en la Figura 7, donde un "contour plot" muestra la diferencia entre el límite de velocidad y la velocidad media de circulación (a nivel sección) para cada rango de ocupación. Las regiones rojas indican que el incumplimiento del límite de velocidad es generalizado para el límite de velocidad y ocupación representado en la celda; verde indica cumplimiento y amarillo indica que el límite de velocidad es superior a la velocidad media (es decir el límite de velocidad es inefectivo). En cada celda del gráfico se muestra el porcentaje que representa el comportamiento mayoritario y el número total de observaciones (minutos). Los resultados se muestran para detectores aislados (lejos de las señales de límite de velocidad y radar, ver Figura 7a) y para detectores con radar (ver Figura 7b).

En la Figura 7a se observa una región verde (cumplimiento) en la diagonal de la tabla, amarillo encima y roja debajo. Esto significa que la velocidad media sigue la relación típica de velocidad-ocupación, sin tener en cuenta los límites de velocidad en vigor. Si la velocidad límite resulta coincidente con la velocidad media dictada por el nivel de ocupación, entonces se cumple, de lo contrario no. Si el límite de velocidad es menor, el exceso de velocidad es generalizado. Si es mayor, es inefectivo. En conclusión, los DSL no tienen

		Day#1	Day#2	Day#3	Day#4	Day#5	Day#6	Day#7
Pórticos de Límites de Velocidad Variable	33-66 PW (13.15)	Límites de velocidad transitorios						
	32-67 PW (12.62)	Límites de velocidad transitorios						
	32 PW (11.64)	SCT	100	80	50	100	80	80
	30 PW (11.20)	SCT	100	80	50	100	80	80
	30 PW L (11.20)	SCT	80	80	50	80	80	80
	29 PW L (10.67)	SCT	100	80	50	100	80	80
	27 PW (10.11)	SCT	100	80	50	100	80	80
	24 PW (9.02)	SCT	100	80	50	100	80	80
	22 PW (8.05)	SCT	100	80	50	100	80	80
	22 PW L (8.05)	SCT	100	80	50	100	80	80
	20 PW (7.28)	SCT	80	80	50	80	80	80
	20 PW L (7.28)	SCT	80	80	50	80	80	80
	18 PW (6.44)	SCT	80	80	80	80	80	80
	17 PW (6.14)	SCT	80	80	80	80	80	60
	17 PW L01 (5.80)	SCT	80	80	80	80	80	60
	17 PW L02 (5.34)	SCT	80	80	80	80	80	60
	13 PW (4.73)	SCT	80	80	80	80	60	40
	11 PW (3.79)	SCT	80	80	80	80	60	40
	08 PW (2.55)	SCT	80	80	80	80	60	40
	06 PW (1.78)	SCT	80	80	80	80	60	40
04 PW (1.10)	SCT	80	80	80	80	60	40	
03 PW (0.74)	SCT	60	60	60	60	60	40	
02 PW (0.37)	SCT	50	50	50	50	50	40	
Cámaras de TV (Alta calidad: 30 fps y 536x400 píxeles).	2306	2312	2312	2312	2306	2306	2306	
	2305	2310	2310	2310	2305	2305	2305	
	2304	2309	2309	2309	2304	2304	2304	
Detectores de detalle (Actuaciones individuales) (ETD – Espira doble) (DT – Detector no intrusivo)	13(DT)	30 (ETD)	30 (ETD)	30 (ETD)	13 (DT)	13 (DT)	13 (DT)	
	12 (ETD)	27 (ETD)	27 (ETD)	27 (ETD)	12 (ETD)	12 (ETD)	12 (ETD)	
	11 (DT)	21 (ETD)	21 (ETD)	21 (ETD)	11 (DT)	11 (DT)	11 (DT)	
	8 (DT)	19 (ETD)	19 (ETD)	19 (ETD)	8 (DT)	8 (DT)	8 (DT)	

Tabla 3. Configuración de los DSL y el equipo de monitorización.

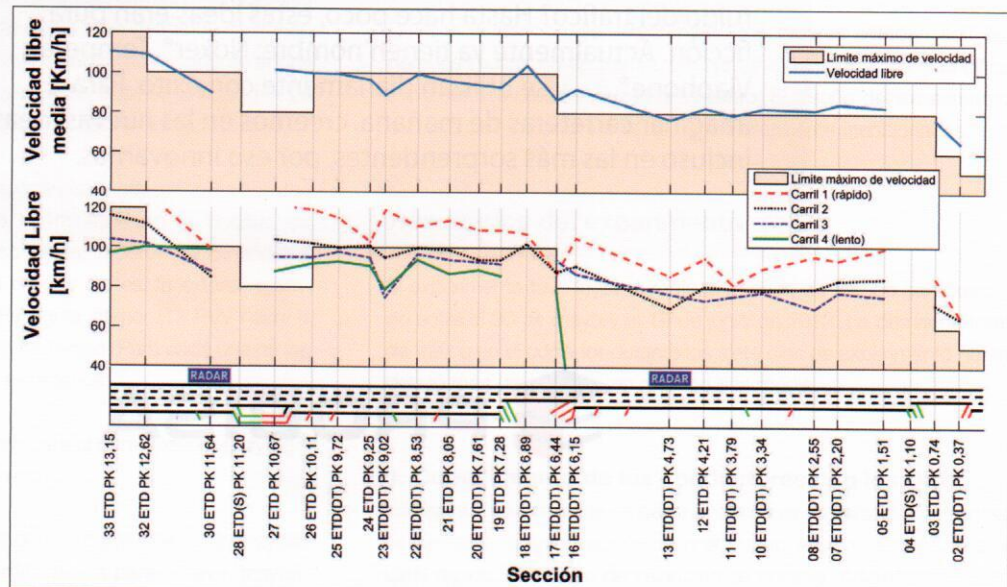


Figura 6. Velocidad libre y límites máximos de velocidad en el corredor experimental.

un efecto generalizado en el comportamiento de los conductores.

Por lo contrario, si solo se consideran secciones con radar (ver Figura 7b), el incumplimiento prácticamente se ve eliminado. En estas secciones los límites de velocidad variables afectan al comportamiento del conductor. Sin embargo el sistema DSL no es capaz de mantener velocidades medias altas cuando hay ocupaciones altas. Este es el motivo por el cual la región amarilla permanece. Esta situación sería la que podría llevar a un incremento de capacidad.

2. Efectos de los DSL en el diagrama fundamental

Los análisis preliminares en relación a los efectos de los DSL en el flujo de tráfico se centran en una sección con radar, donde se ha demostrado un ratio de cumplimiento elevado. Se selecciona la Sección 13 ETD (PK 4,73), compuesta de tres carriles en un tramo relativamente recto. La sección tiene una demanda elevada (véase Figura 2) y está afectada por congestión recurrente originada en un cuello de botella provocado por la salida S11 (1,16 km aguas abajo).

La Figura 8 muestra la relación flujo-ocupación bajo diferentes límites de velocidad en la Sección 13 ETD. La Tabla 4 resume los valores numéricos para los puntos críticos (i.e. máximo flujo) en cada caso. Los resultados empíricos demuestran que:

- Para un límite de velocidad de 80 km/h la capacidad se puede alcanzar para un rango amplio de ocupaciones (de 18% a 26%) y velocidades (de

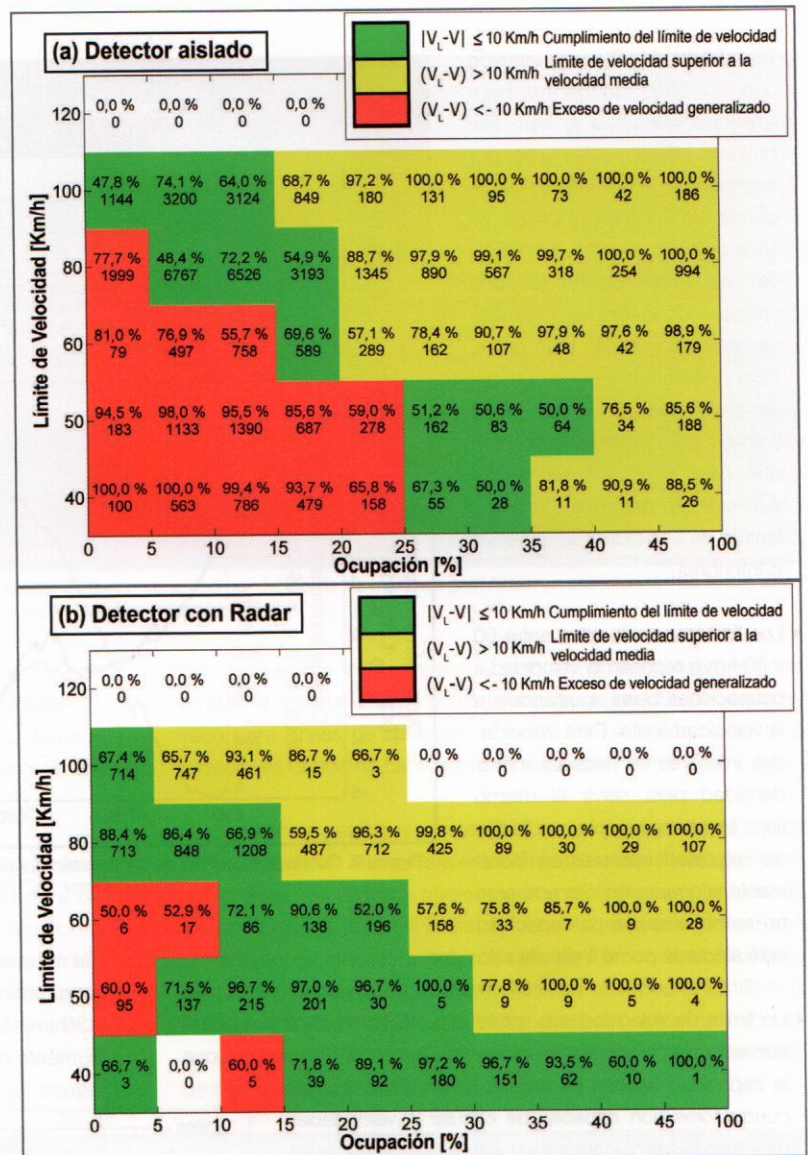
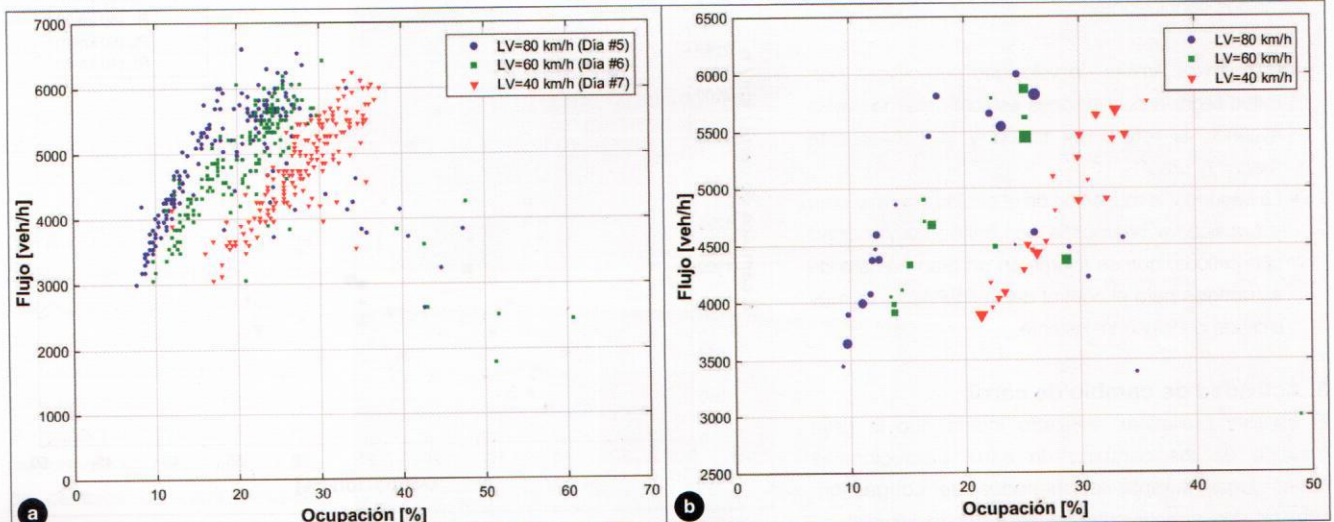


Figura 7. Cumplimiento del límite de velocidad. (a) Detector aislado. (b) Detector con radar.



Nota: 1) Los periodos estacionarios se obtienen según referencia (XXXIV). 2) Se han considerado como estacionarios los periodos que simultáneamente lo son en los tres carriles. 3) El tamaño de los puntos representados es proporcional a la duración del periodo estacionario.

Figura 8. Diagramas flujo-ocupación para diferentes límites de velocidad. Valores medios de la sección. a) Datos agregados por minuto b) Periodos estacionarios.

73 a 50 km/h). En comparación con un caso donde no haya límite de velocidad (o este sea próximo a la velocidad libre, por ejemplo en la referencia (XVII), donde la ocupación crítica se sitúa en torno a 15%), se observa una traslación de la zona crítica a ocupaciones más elevadas y velocidades más bajas. Este fenómeno puede llamarse *achatación* del diagrama flujo-ocupación. Nótese también que para conseguir regímenes sub-críticos debemos imponer límites de velocidad de 50 km/h o inferiores.

- Los límites de velocidad entre 80 y 50 km/h reducen la velocidad a ocupaciones bajas, igualándola a la velocidad límite. Para velocidades inferiores se necesita mayor densidad para servir el mismo flujo. En consecuencia con límites de velocidad inferiores se incrementa la ocupación. Sin embargo no se observa que la capacidad esté afectada por el límite de velocidad.
- Un límite de velocidad sub-crítico (e.g. 40 km/h) implica un claro aumento de la ocupación crítica (hasta un 33%), mientras que la capacidad apenas se reduce (véase Tabla 4). Los conductores son capaces de circular a velocidades muy bajas y densidades muy elevadas en regímenes estables de tráfico. De estas observaciones se pueden sacar dos conclusiones:

- ▶ La primera: límites de velocidad sub-críticos permiten llegar a ocupaciones estables muy elevadas evitando la rotura del tráfico y el consecuente "capacity drop".
- ▶ La segunda: la reducción de capacidad permanente y significativa provocada por límites de velocidad sub-críticos, que se asume en un gran número de estrategias para el control del tráfico^(XXVI, XXVII), es muy limitada o incluso inexistente.

3. Actividad de cambio de carril

El análisis preliminar realizado indica que la gran mayoría de los cambios de carril discretos tienen lugar durante los períodos de congestión. Una prueba concluyente de este hecho se obtiene trazando series temporales de la actividad de cambio de carril acumulada junto con el conteo de vehículos

	Ocupación [%]	Flujo [veh/h]	# cambios de carril [cc/km/h]	Velocidad [km/h]	Duración [min]
Dia#5 Límite: 80 km/h	24,0	5860	817	56,1	30
Dia#6 Límite: 60 km/h	25,1	5617	792	49,6	54
Dia#7 Límite: 40 km/h	33,1	5625	619	40,5	32

Nota: Los valores críticos se obtienen de la media de los valores en períodos estacionarios con flujo máximo durante una duración agregada mínima de 30 minutos.

Tabla 4. Valores críticos en el diagrama flujo-ocupación para diferentes límites de velocidad.

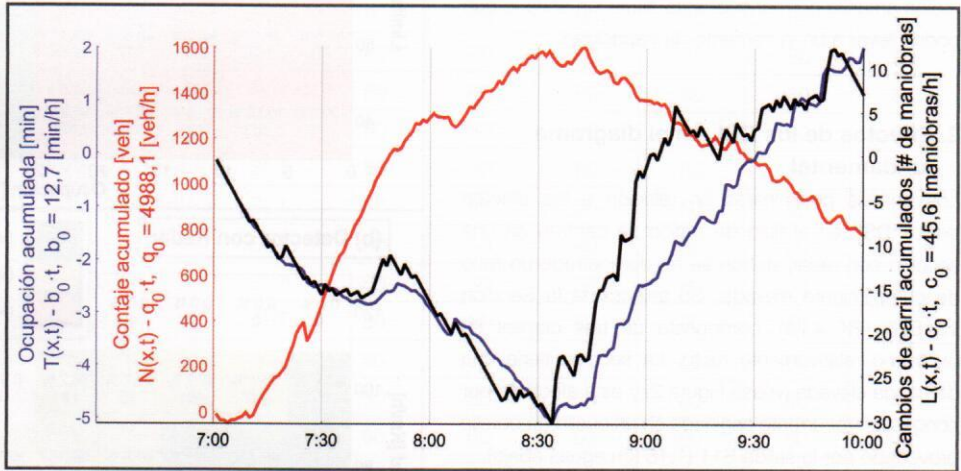
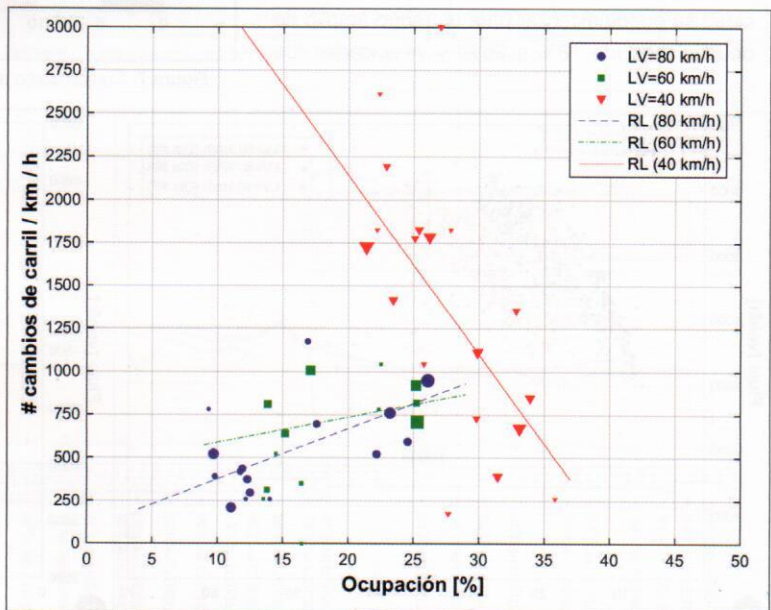


Figura 9. Curvas oblicuas^(XXXVI) de conteo acumulado (N), ocupación (T) y cambio de carril (L) para la cámara 2309 y detector 20ETD(S) el 12 de junio de 2013.

ya la ocupación también acumulados. La Figura 9 muestra que la congestión alcanza la ubicación de la Cámara 2309 cerca de las 8:30 am. Las tendencias opuestas en la ocupación acumulada (aumento de la pendiente en la curva T) frente a conteo acumu-



Nota: 1) Los períodos estacionarios se obtienen según la referencia (XXXIV). 2) El tamaño de los puntos representados es proporcional a la duración del período estacionario.

Figura 10. Diagrama de cambios de carril – ocupación para diferentes límites de velocidad. Períodos estacionarios en régimen libre.



Foto 7. Se produce un incumplimiento generalizado cuando se aplican límites de velocidad por debajo de los máximos permitidos; en esa situación los límites solo se cumplen en las secciones con radar.

lado (disminución de la pendiente en la curva N) a partir de este instante, indican que se trata de un período congestionado^(xxxv). Se ve claramente en la Figura 9 que la tasa de cambio de carril (i.e. la pendiente de la curva L) se incrementa notablemente una vez que aparece la congestión.

El cambio de carril es uno de los fenómenos más perjudiciales para el tráfico denso en autopista. Puede fomentar la rotura del flujo y contribuir a las oscilaciones de tráfico^(xxxvii - xxxix). Esto podría indicar que las ocupaciones muy elevadas que han demostrado ser estables bajo límites de velocidad críticos y sub-críticos sean resultado de una reducción de los cambios de carril. Este efecto sería similar al observado en la activación de carriles VAO^(xxxiii). Efectivamente se puede observar en la Tabla 4 que las ocupaciones críticas bajo límites de velocidad bajos están relacionadas con una tasa de cambio de carril inferior. Sin embargo esto solo es cierto cerca del punto de capacidad, ya que la tasa de cambios de carril es función de la ocupación de la autopista (véase la Figura 10).

La evolución del número de cambios de carril en función de la ocupación de la vía es muy diferente en función del límite de velocidad vigente. Para ocupaciones claramente inferiores a la ocupación crítica un límite de velocidad bajo conlleva una tasa de cambios de carril elevada. Esto puede parecer no intuitivo, ya que generalmente se cree que los límites de velocidad bajos

homogeneizan el tráfico (véase Tabla 1). No obstante hay que tener en cuenta que el efecto de homogenización de los DSL se ha observado para límites de velocidad entre 70-90 km/h con respecto a situaciones donde no había límite de velocidad^(xliv, xviii, xxi, xxii).

Por lo tanto es posible que este efecto no se produzca para límites de velocidad más bajos. Para estos límites tan bajos y ocupaciones sub-críticas, los distintos niveles de aceptación y cumplimiento de los conductores frente al límite de velocidad pueden generar una pérdida de los efectos homogeneizadores y provocar un aumento del número de cambios de carril. Además esto podría justificar el aumento de accidentes leves observados en estos casos^(x). Es necesario continuar con esta línea de investigación para demostrar de manera conclusiva estas hipótesis.



Foto 8. Los límites de velocidad críticos y sub-críticos trasladan la ocupación crítica a rangos muy elevados, por ejemplo a un 33% de ocupación en el caso del límite de 40 km/h, sin reducir significativamente el flujo de vehículos.

Conclusiones

Este artículo presenta una base de datos exhaustiva de las variables de tráfico medidas en una única autopista donde se aplicaron diferentes límites de velocidad y bajo contextos de demanda de tráfico similares. Esto incluye mediciones simultáneas utilizando las diferentes tecnologías de monitorización disponibles. La base de datos resultante se pone a disposición de toda la comunidad científica⁹⁾ con el fin de proporcionar una base de datos empíricos sólida desde donde construir y validar teorías y modelos.

La disponibilidad de una base de datos de tales características debe conducir a pruebas más concluyentes sobre los efectos de las estrategias de DSL. Los resultados preliminares muestran que los DSL sólo tienen una tasa de cumplimiento elevada en las secciones con radar (Foto 7). En estas secciones la capacidad de las estrategias de DSL para restringir el flujo en el tronco de autopista (i.e. "mainline metering") mediante la creación de cuellos de botella artificiales es prácticamente nula.

Esto es debido a que los límites de velocidad críticos y sub-críticos trasladan la ocupación crítica a rangos muy elevados, por ejemplo a un 33% de ocupación en el caso del límite de 40 km/h, sin reducir significativamente el flujo de vehículos (Foto 8). Esto puede ser debido a la disminución del número de cambios de carril observada en estas situaciones. No obstante en regímenes libres el comportamiento es el contrario: límites de velocidad bajos aumentan la tasa de cambios de carril. El motivo de este comportamiento diferenciado podría ser la pérdida de homogenización en regímenes libres bajo límites de velocidad reducidos.

La base de datos obtenida abrirá las puertas a múltiples temas de investigación. Estos pueden incluir la habilidad de los DSL para aumentar la capacidad de un cuello de botella y reducir el fenómeno del "capacity drop", o para evitar restricciones temporales dentro de las colas debidas a las inestabilidades "stop & go", aumentando de este modo la tasa de descarga de las colas.

También las causas de estos efectos deben ser objeto de investigación, como la armonización de velocidad bajo DSL, la reducción de la variabilidad en la utilización de los carriles, la reducción de los cambios de carril discretos, los efectos de DSL en las inestabilidades de tráfico y la modificación de las distribuciones de los intervalos o espaciados entre vehículos. Los datos a nivel de vehículo pueden ser muy útiles para estos objetivos, que finalmente lleven a diseñar mejores estrategias implementando los nuevos conocimientos adquiridos.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Jordi Janot y de la Dr. Mónica Menéndez de ETH Zürich por su trabajo en el análisis preliminar de los datos. El asesoramiento prestado por Josep Maria Torné (BarcelonaTech) en la construcción de la base de datos y por Anthony Patire y Robert Campbell (PATH-UC Berkeley) y Bernat Goñi (TU Delft) en el procesamiento de imágenes de vídeo también se agradece.

Este experimento no habría sido posible sin la colaboración e implicación de todo el personal del Servei Català del Trànsit. De su director Joan Josep Isern y su personal ejecutivo que ayudó en el diseño y ejecución del experimento y especialmente de Òscar Llatge que impulsó el experimento hasta convertirlo en una realidad. Por último, se agradece el duro trabajo en el centro de control durante los días del experimento de Javi Romero y Carles Argüelles (UTE Acc. Sur Acisa-Aluvisa) y su personal.

El experimento ha sido parcialmente financiado por el Servei Català del Trànsit (CM-12/2013) y por el Ministerio de Ciencia e Innovación (TRA2013-45250-R / CARRIL).

Referencias bibliográficas

- I. Soriguera, F. y M. Sala. (2013). "B23 Dynamic Speed Limit Database". Disponible online en <http://bit.ly/1eo948e> (visitado 6 de marzo de 2015).
- II. Zackor, H. (1972). "Beurteilung verkehrabhängiger geschwindigkeitsbeschränkungen auf autobahnen". Strassenbau und strassenverkehrstech 128. 1-61.
- III. Remeijn, H. (1982). "The Dutch motorway control and signalling system". Rijkswaterstaat. Traffic Engineering Division. Dutch Ministry of Transport. La Haya.
- IV. Sumner, R.I. y C.M. Andrew. (1990). "Variable speed limit system". Report FHWA-RD-89-001. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.
- V. Zarean, M., M.D. Robinson y D. Warren. (2000). "Applications of variable speed limit systems to enhance safety". Proceedings of the 7th World Congress on ITS. 6-9 Noviembre 2000. Turin. Italia.
- VI. Lennie, S., C. Han, J. Luk, V. Pyta y P. Cairney. (2009). "Best practice for variable speed limits: Literature review". Austroads Publication. AP-R342/09.
- VII. Stoelhorst, H. (2008). "Reduced speed limits for local air quality and traffic efficiency". Proceedings of the 7th European Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services. Génova.
- VIII. Baldasano, J.M., M. Gonçalves, A. Soret y P. Jiménez-Guerrero. (2010). "Air pollution impacts of speed limitation measures in large cities: The need for improving traffic data in a metropolitan area". Atmospheric Environment 44(25). 2997-3006.
- IX. Soriguera, F., J.M. Torné y D. Rosas. (2013). "Assessment of dynamic speed limit management on metropolitan freeways". Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations 17 (1). 78-90.
- X. Sisiopiku, V. P. (2001). "Variable Speed Control: Technologies and Practice". Proc., 11th Annual Meeting of ITS America, Miami, Florida.

- XI. Lee, C., B. Hellinga y F. Saccomanno. (2006). "Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 14(3). 213-228.
- XII. Sultan, B., R. Meekums y M. Brown. (2008). "The impact of active traffic management on motorway operation". *Road Transport Information and Control-RTIC 2008 and ITS United Kingdom Members' Conference*. IET. 1-8.
- XIII. Cremer, M. (1979). "Der Verkehrsfluss auf Schnellstrassen: Modelle, Überwachung". *Regelung*. Springer-Verlag.
- XIV. Smulders, S. (1990). "Control of freeway traffic flow by variable speed signs". *Transportation Research Part B* 24(2). 111-132.
- XV. Zackor, H. y M. Papageorgiou. (1991). "Speed limitation on freeways: Traffic-responsive strategies". *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. 507-511.
- XVI. Hegyi, A., B. De Schutter and H. Hellendoorn. (2005). "Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits". *Transportation Research Part C*, 13(3), 185-209.
- XVII. Papageorgiou, M.E. Kosmatopoulos y I. Papamichail. (2008). "Effects of variable speed limits on highway traffic flow". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2047. 37-48.
- XVIII. Van Den Hoogen, E. y S. Smulders. (1994). "Control by variable speed signs: Results of the Dutch experiment". *Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*. 145-149.
- XIX. Nissan, A. y H.N. Koutsopoulos. (2011). "Evaluation of the impact of advisory variable speed limits on motorway capacity and level of service". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 16, 100-109.
- XX. Heydecker, B.G. y J.D. Addison. (2011). "Analysis and modelling of traffic flow under variable speed limits". *Transportation Research Part C*, 19(2), 206-217.
- XXI. Knoop, V.L., A. Duret, C. Buisson y B. van Arem. (2010). "Lane distribution of traffic near merging zones influence of variable speed limits". *Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Isla de Madeira, Portugal, Septiembre 19-22, 485-490.
- XXII. Duret, A., S. Ahn y C. Buisson. (2012). "Lane flow distribution on a three-lane freeway: General features and the effects of traffic controls". *Transportation Research Part C*, 24, 157-167.
- XXIII. Cassidy, M.J., J. Rudjanakanoknad. (2005). "Increasing the capacity of an isolated merge by metering its on-ramp". *Transportation Research Part B* 39(10) 896-913.
- XXIV. Hegyi, A., S.P. Hoogendoorn, M. Schreuder, H. Stoelhorst y F. Viti. (2008). "SPECIALIST: A dynamic speed limit control algorithm based on shock wave theory". *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 827-832.
- XXV. Hegyi, A. y S.P. Hoogendoorn. (2010). "Dynamic speed limit control to resolve shock waves on freeways - Field test results of the SPECIALIST algorithm". *Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. 519-524.
- XXVI. Carlson, R.C., I. Papamichail, M. Papageorgiou y A. Messmer. (2010). "Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering". *Transportation Science* 44(2), 238-253.
- XXVII. Laval, J.A., y C.F. Daganzo. (2005). "Multi-lane hybrid traffic flow model: a theory on the impacts of lane-changing maneuvers". Presented at the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- XXVIII. Laval, J.A., y C.F. Daganzo. (2006). "Lane-changing in traffic streams". *Transportation Research Part B* 40, 251-264.
- XXIX. Laval, J.A., M.J. Cassidy, y C.F. Daganzo (2007). "Impacts of lane-changes at merge bottlenecks: a theory and strategies to maximize capacity". *Traffic and Granular Flow*, Berlin, 577-586.
- XXX. Duret, A., S. Ahn y C. Buisson. (2009). "Spatio-temporal analysis of impacts of lane changing consistent with wave propagation". *Proceedings of the 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C.
- XXXI. Ahn, S., y M.J. Cassidy. (2007). "Freeway traffic oscillations and vehicle lane-change maneuvers". *Proceedings of the 17th International Symposium of Transportation and Traffic Theory*, Londres, 691-710.
- XXXII. Menendez, M., y C.F. Daganzo (2007). "Effects of HOV Lanes on Freeway Bottlenecks". *Transportation Research Part B* 41, 809-822.
- XXXIII. Cassidy, M.J., K. Jang y C.F. Daganzo. (2010). "The smoothing effect of carpool lanes on freeway bottleneck". *Transportation Research Part A* 44, 65-75.
- XXXIV. Cassidy, M.J. (1998). "Bivariate relations in nearly stationary highway traffic". *Transportation Research Part B* 32(1), 49-59.
- XXXV. Cassidy, M.J. y M. Mauch. (2001). "An observed traffic pattern in long freeway queues". *Transportation Research Part A* 35(2). 143-156.
- XXXVI. Cassidy, M.J. y J. Windover. (1995). "Methodology for assessing dynamics of freeway traffic flow". *Transportation Research Record* 1484. 73-79. ■