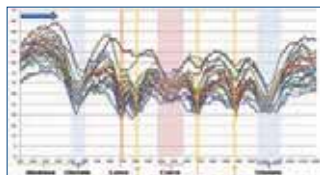


# Evaluación del Efecto de la Tipología y la Separación de los Elementos Moderadores de la Velocidad en la Funcionalidad del Tráfico



## Evaluation of Effect of Type and Spacing of Traffic Calming Devices on Traffic Operation

**Alfredo García**  
Catedrático

*Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras  
Universitat Politècnica de València*

**Mario Romero**

*PhD, Purdue University, Indiana, USA*

**Ana Tsui Moreno**

*Personal Investigador*

*Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras  
Universitat Politècnica de València*

**Antonio José Torres**

*Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos*

### Resumen

La moderación del tráfico es una de las medidas de seguridad vial más empleadas para reducir tanto la frecuencia como gravedad de los accidentes de tráfico en vías urbanas y travesías. Sin embargo, la implementación de medidas de moderación implica una reducción de la capacidad de las vías.

En el presente artículo se ha estudiado el efecto de la moderación del tráfico en la capacidad de travesías mediante un estudio de microsimulación de tráfico. Concretamente, se ha analizado la influencia de la separación entre elementos y el tipo de dispositivos. Para obtener la capacidad, se ha calculado la demora media producida a lo largo de la travesía, para posteriormente fijar la capacidad de la vía dada una separación entre moderadores del tráfico como aquella intensidad de tráfico a partir de la cual la demora presenta un crecimiento exponencial. La capacidad de las travesías varía entre 810 y 1300 vehículos por hora y carril de circulación con una separación entre elementos entre 25 y 400 m.

Por otro lado, se ha analizado la funcionalidad de la travesía según la intensidad de tráfico, determinando la zona en la cual los vehículos circularían en flujo libre. Dicha zona depende de la separación entre dispositivos y del tipo de dispositivo, y su límite se encuentra sobre los 700-800 veh/h. Extrapolando los resultados a la intensidad media diaria, se puede concluir que los dispositivos moderadores del tráfico pueden implementarse en vías con intensidad media diaria entre 9000 y 12000 veh/día funcionando en flujo libre, el cual supone un umbral significativamente superior al establecido en la Instrucción de Fomento, de 5000 veh/día.

**PALABRAS CLAVES:** moderación del tráfico, capacidad, microsimulación de tráfico.

### Abstract

Traffic calming is widely implemented to improve road safety in order to reduce both frequency and severity of road crashes. This measure is often implemented on urban roads and crosstown roads. However, the implementation of traffic calming devices implies less capacity of cross-town roads.

The present research used traffic microsimulation to study the effect of traffic calming devices on the cross-town roads capacity based on different type and spacing of devices. Average delay was calculated. Then, the capacity of the road was obtained for a fixed traffic calming device spacing as the flow rate from which delay presented exponential growth. Capacity of a cross-town road varied between 810 and 1,300 vehicles per hour and lane with traffic calming devices spacing from 25 to 400 meters.

On the other hand, operational performance was also studied based on average delay per car. Free-flow condition zone was identified depending on both type and spacing. It was found that the threshold of free flow conditions was about 700-800 veh/h. According to typical Spanish daily distribution of traffic, hourly values were extrapolated to daily values. Consequently, the recommended maximum daily traffic volume to implement traffic calming measures is between 9,000 and 12,000 veh/day. The value is much higher than the 5,000 veh/day recommended on Spanish Standards.

**KEY WORDS:** traffic calming, capacity, traffic microsimulation.

## 1. Introducción

La moderación del tráfico es una práctica que se ha extendido principalmente en los países desarrollados. En algunos países, esta medida se ha incorporado a través del diseño urbano del espacio público, usualmente con programas que restringen el tráfico individual y favorecen e impulsan el tráfico colectivo y la mejora de la calidad ambiental. La moderación del tráfico tiene dos objetivos principales: la reducción de la frecuencia de los accidentes y la gravedad de los mismos, y la mejora del medio ambiente del entorno en donde se implementan (Sanz, 2008). Esto implica, en algunos casos, la reducción de la intensidad de tráfico y, por supuesto, la disminución de la velocidad de los vehículos que circulan a través de la zona.

Entre los elementos que más se emplean en la moderación del tráfico, destacan las medidas que implican una alteración en el alzado de la vía, como los pasos peatonales elevados, los lomos transversales o los resaltes prefabricados. Los lomos transversales son elevaciones de la rasante de la calzada, mediante un perfil curvo, diseñado específicamente para mantener una velocidad reducida, mientras que un resalte prefabricado es un lomo transversal en un tramo corto, inferior a 1 m de longitud. Por su parte, los pasos peatonales elevados consisten en la elevación de la superficie que ocupa un paso para peatones a una altura de escasos centímetros sobre la calzada, proporcionando una meseta por la que cruzan los peatones, y que dispone de unas rampas de acceso a la sobreelevación en el sentido longitudinal de paso de los vehículos.

En los últimos años, se han desarrollado bastantes normativas y guías para el diseño de los dispositivos de moderación del tráfico (Ewing y Brown, 2009; ITE, 2007; Ministerio de Fomento, 2008; Dirección General de Obras Públicas de la Comunidad Valenciana, 2004; CERTU, 2010, FHWA,

2010). En ellas, se especifican las características geométricas y las ubicaciones más apropiadas de los dispositivos de moderación del tráfico (DMT), así como el rango de tráfico recomendado en el que se pueden implementar. Según la Instrucción de Fomento (2008), se recomienda la implementación de medidas de moderación del tráfico en travesías con una intensidad media diaria de hasta 5000 vehículos/día, mientras que en otras normativas internacionales dicho umbral es de 10000 vehículos/día (CERTU, 2010, FHWA, 2009).

Se han llevado a cabo varias investigaciones para analizar el efecto de las medidas de moderación del tráfico en la operación del tráfico. En ellas, se ha obtenido una disminución en la velocidad de operación del 18% (Ewing, 1999; Hallmwaik et al., 2002; Zech et al., 2009). En estudios antes-después, se ha comprobado que la velocidad media se reduce entre 6 y 13 km/h en pasos elevados y en lomos transversales (Hallmark et al., 2002; Hallmark et al., 2008; Zech et al., 2009). Además, la reducción de velocidad en los lomos transversales es superior que en los otros dispositivos (Fehr & Peers Transportation Consultants, 2010). Por su parte, Pau y Angius (2001) determinaron que los resaltes prefabricados no eran efectivos, puesto que no existían diferencias estadísticamente significativas en los valores observados a lo largo de una vía.

Por otro lado, la reducción de velocidad por la presencia de moderadores del tráfico depende en gran medida de la distancia entre medidas (Ewing y Hodder, 1996; García et al., 2010). Es más, si el espaciamiento es muy reducido, existe un efecto de acumulación de medidas, por el que las medidas funcionan de forma conjunta y redundante (Zech et al, 2009; Abate et al., 2009). No obstante, los efectos del tipo de moderador del tráfico vertical y la distancia entre moderadores en la capacidad o en la operación del tráfico no han sido analizados hasta el momento.).

## 2. Objetivos

El principal objetivo de la investigación es determinar los efectos de los elementos de moderación del tráfico que suponen una variación de la rasante de la vía en la capacidad y funcionalidad del tráfico en travesías.

Para ello, se han identificado una serie de objetivos: observar y analizar el comportamiento de los conductores en cinco travesías con moderadores del tráfico empleando dispositivos rastreadores GPS, calibrar y validar un modelo de microsimulación, aplicar el modelo a diversos escenarios configurados con diferentes distancias entre elementos y sometidos a crecientes demandas de tráfico, y analizar los resultados. En consecuencia, la metodología empleada incluye tres etapas

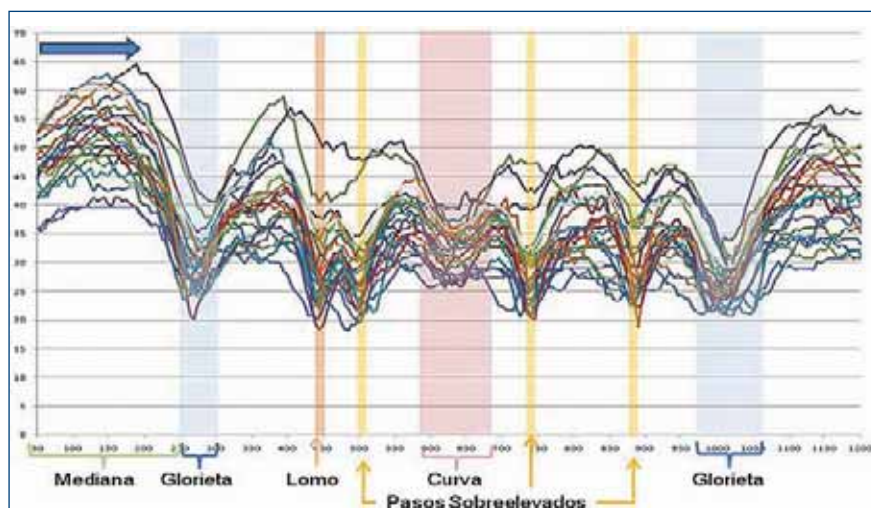


Figura 1: Perfiles continuos de velocidad individuales obtenidos en la travesía de Genovés.

principales: estudio de campo, modelo de microsimulación de tráfico y análisis de los resultados. Cada una de las etapas se desarrolla en las siguientes secciones.

## 3. Estudio de campo

La primera etapa de la investigación consistía en seleccionar cinco travesías de la provincia de Valencia con elementos de moderación del tráfico. La selección de travesías se ha realizado siguiendo las recomendaciones de un estudio de seguridad vial previo, considerando: intensidad media diaria, longitud de la travesía y tipo de medidas de moderación del tráfico existentes. Las travesías seleccionadas fueron: Genovés (IMD = 2600 veh/d; L = 925 m); Quatretonda (IMD = 3240 veh/d; L = 685 m); Llutxent (IMD = 2930 veh/d; L = 580 m); Albalat de la Ribera (IMD = 4230 veh/d; L = 860 m); y Chelva (IMD = 2450 veh/d; L = 1250 m). En total se analizaron 16 pasos elevados y 5 lomos transversales. Las características de los escenarios se resumen en Moreno et al. (2011).

La toma de datos se realizó con dispositivos rastreadores GPS, que registraban cada segundo la posición del vehículo de los conductores voluntarios. Para la entrega y recogida de los GPS, se situaron dos controles de carretera por lo menos 1 km antes y después de la población, para que los conductores pudieran desarrollar la velocidad deseada antes de llegar a la población. En dichos controles, se paraban a los conductores de vehículos ligeros y se les pedía su colaboración en un estudio de seguridad vial. Tras su consentimiento, se les colocaba un dispositivo GPS en el techo o el capó del vehículo y se les recordaba que condujeran como lo hacían habitualmente. Mediante grabaciones de vídeo y la obtención de velocidades puntuales antes y durante las observaciones, se comprobó que los conductores no modificaban su comportamiento por las pruebas realizadas. En cada travesía, se tomó

una muestra de al menos 80 vehículos por sentido, con una muestra final de más de 900 vehículos. Posteriormente, se obtuvieron los perfiles de velocidad y aceleración de los vehículos en flujo libre (Figura 1). Cerca de un 10% de la muestra inicial se descartó por no encontrarse en flujo libre, desvíos o paradas. Además, las características geométricas de los lomos y los pasos peatonales elevados se midieron con un perfilómetro digital, obteniendo el perfil longitudinal de las medidas de moderación en la sección por la que los vehículos circulaban. Tras la toma de datos, se filtraron y rotaron las coordenadas. Posteriormente, se calcularon las pendientes y la altura (García et al., 2010).

Los perfiles se correlacionaron con la ubicación y características geométricas de los dispositivos. Por tanto, el comportamiento de los conductores se asoció con la geometría de las medidas de moderación del tráfico.

## 4. Modelo de Microsimulación

El programa de microsimulación de tráfico VISSIM 5.1 se seleccionó para analizar la capacidad en travesías con elementos de moderación del tráfico. En esta sección se presenta una breve descripción del modelo de microsimulación del tráfico y los principales aspectos que son críticos para modelizar la operación del tráfico.

### Programa de microsimulación de tráfico:

VISSIM 5.1 es un programa de microsimulación del tráfico multimodal que puede asignar el comportamiento a vehículos individuales que circulan por una red desde su origen a su destino. Es más, las variables macroscópicas también pueden analizarse gracias a las reglas de calibración del programa, y se pueden modelizar diferentes modos de transporte y su interacción. VISSIM 5.1 puede utilizarse en múltiples análisis como estudios de movilidad, sistemas inteligentes

de tráfico o sistemas de explotación y gestión de la red (Fellendorf y Vortisch, 2001; Barceló et al., 2011). El programa de microsimulación de tráfico está constituido por dos subprogramas. El primero de ellos genera el modelo de flujo de tráfico, donde se definen todas las variables relacionadas con la red. En el segundo subprograma se incluyen las reglas de comportamiento de los vehículos, peatones, etc. que dependen de los parámetros del flujo de tráfico. Para el modelo de comportamiento, se emplea el modelo de Wiedemann, en el cual la respuesta de un vehículo es función de la velocidad relativa percibida con el vehículo que le precede. Después, se puede producir cuatro respuestas: circulación en flujo libre, aproximación, seguimiento y frenada. Además, VISSIM tiene implementado un modelo de cambio de carril.

### Calibración y validación del modelo de microsimulación:

La calibración del modelo de microsimulación es uno de los pasos más importantes al emplear este tipo de herramientas, puesto que así se verifica que el comportamiento de los vehículos en el simulador de tráfico representa el comportamiento de los conductores en la realidad.

La calibración del modelo se ha realizado empleando la travesía de Genovés. En el modelo de microsimulación se ajustaron los datos de volumen de tráfico, composición, pendiente y perfiles de velocidad. Los perfiles de velocidad se representaron por siete percentiles: 0, 5, 15, 50, 85, 95 y 100 deducidos del estudio de campo, que incluían a todas las travesías, no únicamente la de Genovés.

Para modelizar los cambios temporales de velocidad que sufren los vehículos en el entorno de las medidas de moderación del tráfico, se generaron unos conectores alrededor de las medidas con longitud igual a 5 m, que constituían las áreas de velocidad reducida. En ellas, se asignó la distribución

de perfiles de velocidad obtenida del estudio de campo, al igual que la deceleración media y la aceleración media. No obstante, únicamente con las áreas de velocidad reducida no se puede modelizar el comportamiento completo de los conductores al sobrepasar una medida de moderación del tráfico, puesto que con anterioridad a las medidas, los conductores ya modifican su comportamiento para adaptar la velocidad deseada a la velocidad de paso sobre el elemento. En consecuencia,

se definieron unas áreas de decisión de velocidad con anterioridad y posterioridad a los elementos. Estas áreas comenzaban 25 m antes de los elementos y se extendían hasta 25 m después de los mismos, puesto que en su longitud se ha considerado la mayor reducción de velocidad antes de un moderador del tráfico, que suele ser a partir de la situación de la señal de resalte. En dichas áreas, se asignaron los perfiles de velocidad observados. Una vez el modelo estaba definido y cali-

brado según los datos de campo, se realizó la validación de los resultados. En este caso, se disponía de la geometría de la travesía de Genovés pero con los datos procedentes de las cinco travesías observadas. En la validación se comprobó que la distribución del perfil de velocidad en la travesía de Genovés con los datos de la propia travesía era similar que la que proporcionaba el modelo de microsimulación, puesto que las otras variables permanecían constantes durante la simulación.

Tabla 1: Distribución de simulaciones.

| Medida                    | %<br>Vehículos<br>pesados | Distancia<br>(m) | Volumen<br>de tráfico<br>inicial (veh./h) | Volumen<br>de tráfico<br>final (veh/h) | Salto de volumen<br>de tráfico<br>(veh./h) | Simulaciones |
|---------------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|
| Sin moderadores           | 0                         | -                | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
| Pasos elevados<br>(Pe<5%) | 0-20<br>(Salto 5)         | 25               | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 55           |
|                           |                           | 50               | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 55           |
|                           |                           | 100              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 55           |
|                           |                           | 200              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 55           |
|                           |                           | 400              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 55           |
| Pasos elevados<br>(Pe>5%) | 0                         | 25               | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 50               | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 100              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 200              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 400              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
| Lomos transversales       | 0                         | 25               | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 50               | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 100              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 200              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           | 400              | 100                                       | 2100                                   | 200                                        | 11           |
|                           |                           |                  |                                           |                                        | TOTAL                                      | 396          |

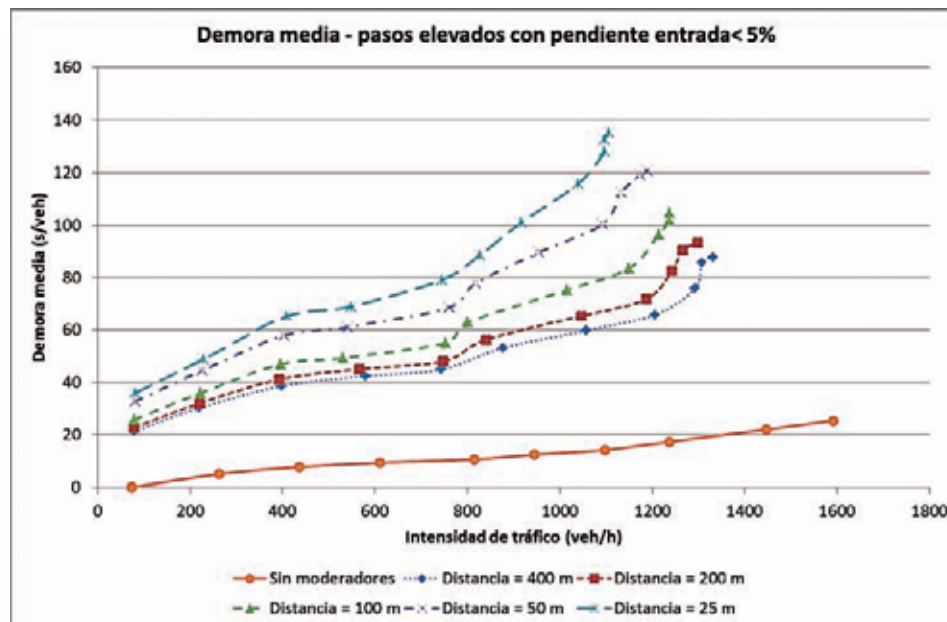


Figura 2: Demora media en pasos peatonales eleva.

#### Escenarios simulados:

Tras la calibración y validación del modelo de microsimulación, se generaron diversos escenarios para analizar el efecto de las medidas de moderación del tráfico en la capacidad de la travesía. Para ello, se creó una travesía ideal con un trazado consistente en una única recta con longitud igual a 1400 m. En ella, se dispusieron diferentes escenarios en función de la distancia entre moderadores y el tipo de elementos. El espaciamiento

entre medidas variaba entre 25 y 400 m, de tal forma que los elementos se distribuían a lo largo de los 900 m centrales. El primer y el último segmento, con longitud de 250 m cada uno, no poseía moderadores del tráfico. El número y ubicación de las medidas se deducía en función del espaciamiento seleccionado. En cuanto a los tipos de medidas, se consideraron los pasos peatonales elevados con pendiente inferior al 5%, pasos elevados con pendiente superior al 5% y lomos transversales. Además, se estudió el

efecto de los vehículos pesados, con porcentajes de vehículos pesados entre el 0 y 20% en el caso de pasos elevados con pendiente inferior al 5%. En cada una de las combinaciones anteriores, el volumen de tráfico se iba aumentando paulatinamente desde 100 veh/h hasta 2100 veh/h, con un salto de 200 veh/h. En la Tabla 1 se resumen las 396 simulaciones ejecutadas.

Tras la generación de los escenarios, se ejecutaron las simulaciones. Cada simulación tenía una duración de 75 minutos, de la cual los primeros

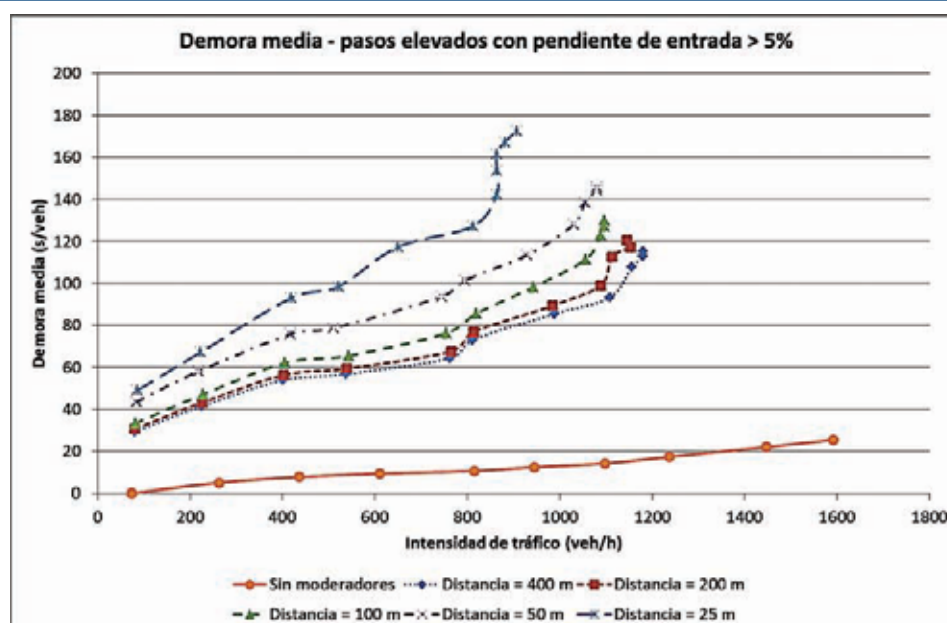


Figura 3. Demora media en pasos peatonales elevados con pendiente de entrada superior al 5%.

10 minutos servían para llenar la red de vehículos y estabilizar el flujo de tráfico, y los últimos 5 minutos para vaciar la misma. En consecuencia, dichos periodos no eran considerados en el análisis. Dentro del análisis, se han evaluado diversos niveles de demanda, puesto que el objeto de la investigación era determinar la capacidad en las travesías con diferentes espaciamientos entre dispositivos de moderación del tráfico y tipos de moderadores. Por tanto, el flujo de tráfico se incrementaba progresivamente. En cada simulación, se obtenía la demora media.

## 5. Resultados del Modelo de Microsimulación

Los resultados de las diferentes simulaciones se han analizado en dos partes fundamentales: influencia en la capacidad e influencia en la funcionalidad del tráfico.

### Capacidad

La capacidad de un segmento de vía se define como la intensidad máxima horaria que es capaz de absorber medida en vehículos por hora. La capacidad de cada escenario se ha calculado en función de la demora media, que se ha representado en función de la intensidad de tráfico. Posteriormente,

la capacidad se ha determinado como la intensidad de tráfico a partir de la cual el incremento en la demora era exponencial, en lugar de utilizar un umbral predeterminado. Los principales resultados se presentan en función del tipo de moderador del tráfico: pasos elevados y lomos transversales. Además, se incluye el análisis del efecto de los vehículos pesados.

### Pasos elevados

El análisis de la capacidad se ha realizado en función de la pendiente de la rampa de entrada del paso elevado, puesto que en estudios anteriores se ha confirmado como un factor clave en la elección de velocidad por parte de los conductores: a mayor pendiente de entrada, menor velocidad sobre el dispositivo (Moreno et al., 2011). Además, no se encontraron correlaciones entre la altura del dispositivo y la velocidad de paso o la reducción de velocidad. En este primer análisis, no se han considerado vehículos pesados.

Como se puede observar en la Figura 2 y Figura 3, la demora media en los pasos elevados depende tanto de la distancia entre dispositivos como de la intensidad de tráfico. En consecuencia, la capacidad depende del espaciamiento de las medidas de moderación del tráfico. La demora media

varía entre 75 y 105 segundos, en el caso de pasos elevados con pendiente de entrada inferior al 5%, mientras que en el segundo caso de pasos los valores se encuentran entre 95 y 142 segundos, por lo que la demora media se aumenta entre un 50 y 100% en función de la pendiente de la rampa de entrada, lo cual demuestra cómo la pendiente de entrada es un factor clave en la demora media, y, en consecuencia, en la capacidad. Las figuras muestran que sin medidas de moderación del tráfico, la operación es similar a la de una travesía simple, sin reducciones de velocidad causadas por los moderadores. Básicamente, la demanda se satisface plenamente hasta la última intensidad de tráfico introducida en el modelo. Al incorporar las medidas de moderación del tráfico, la capacidad de la travesía disminuye, como se muestra en la Tabla 2. La diferencia entre la capacidad de una travesía sin moderadores del tráfico y con moderadores del tráfico es superior en el caso de los moderadores con mayor pendiente de entrada.

En la Tabla 2 se proponen dos valores de capacidad, uno recomendado y otro máximo. Para cada valor de distancia, se ha comparado la capacidad sin moderadores del tráfico y la asociada a dicho espaciamiento y se ha obtenido la reducción en la capacidad. Además, se ha calculado la

| Tabla 2: Capacidad de travesías con pasos peatonales elevados. |               |                   |           |                        |                   |                   |           |                        |                   |
|----------------------------------------------------------------|---------------|-------------------|-----------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------|------------------------|-------------------|
| Pe (%)                                                         | Distancia (m) | Propuesta         |           |                        |                   | Máxima            |           |                        |                   |
|                                                                |               | Capacidad (veh/h) | % sin MDT | Velocidad media (km/h) | Nivel de servicio | Capacidad (veh/h) | % sin MDT | Velocidad media (km/h) | Nivel de servicio |
| -                                                              | Sin MDT.      | 1.700             | -         | 50                     | B                 | 1.700             | -         | 50                     | B                 |
| <5                                                             | 400           | 1.200             | 29        | 30                     | D                 | 1.290             | 24        | 28                     | D                 |
|                                                                | 200           | 1.180             | 31        | 29                     | D                 | 1.240             | 27        | 27                     | D                 |
|                                                                | 100           | 1.150             | 32        | 27                     | D                 | 1.210             | 29        | 25                     | E                 |
|                                                                | 50            | 1.090             | 36        | 25                     | E                 | 1.130             | 34        | 24                     | E                 |
|                                                                | 25            | 1.040             | 39        | 23                     | E                 | 1.090             | 36        | 21                     | F                 |
| >5                                                             | 400           | 1.100             | 35        | 26                     | E                 | 1.155             | 32        | 24                     | E                 |
|                                                                | 200           | 1.085             | 36        | 25                     | E                 | 1.100             | 35        | 23                     | E                 |
|                                                                | 100           | 1.080             | 36        | 22                     | E                 | 1.100             | 35        | 22                     | E                 |
|                                                                | 50            | 1.050             | 38        | 21                     | F                 | 1.080             | 36        | 20                     | F                 |
|                                                                | 25            | 810               | 52        | 22                     | F                 | 860               | 49        | 20                     | F                 |

Tabla 3: Capacidad de una travesía con lomos transversales.

| Distancia (m) | Propuesta         |           |                        |                   | Máxima            |           |                        |                   |
|---------------|-------------------|-----------|------------------------|-------------------|-------------------|-----------|------------------------|-------------------|
|               | Capacidad (veh/h) | % sin MDT | Velocidad media (km/h) | Nivel de servicio | Capacidad (veh/h) | % sin MDT | Velocidad media (km/h) | Nivel de servicio |
| Sin MDT.      | 1.700             | -         | 50                     | B                 | 1.700             | -         | 50                     | B                 |
| 400           | 1.190             | 30        | 30                     | D                 | 1.270             | 25        | 28                     | D                 |
| 200           | 1.170             | 31        | 28                     | D                 | 1.220             | 28        | 26                     | E                 |
| 100           | 1.110             | 35        | 26                     | E                 | 1.160             | 32        | 24                     | E                 |
| 50            | 1.050             | 38        | 24                     | E                 | 1.080             | 36        | 23                     | E                 |
| 25            | 1.025             | 40        | 22                     | E                 | 1.050             | 38        | 21                     | F                 |

velocidad media de recorrido y se ha obtenido el nivel de servicio asociado a dicha velocidad, evaluando las condiciones operacionales.

En los pasos elevados con menor pendiente de entrada, la implementación de dispositivos separados 400 m en la travesía ya implica una reducción de capacidad del 24%. Es más, la capacidad se reduce en un 36% en el caso de una distancia entre moderadores de 25 m, mientras que el valor es del 28% en las travesías con elementos distanciados 100 m. Se puede observar cómo las diferencias son superiores en los pasos elevados con mayor pendiente de entrada: mientras que una separación de 400 m implica una reducción de la capacidad en un 32%, en el caso de 25 m esta es del 49%. Un segundo análisis de los valores refleja que existen dos umbrales a partir

de los cuales se produce un mayor descenso en la capacidad. El primero de ellos es común a todos los pasos elevados y se localiza en 400 m. El segundo depende de la pendiente de la rampa de entrada: 100 m y 50 m para pendientes de entrada menores al 5% y superiores al 5%, respectivamente.

Para analizar las condiciones operacionales de los anteriores umbrales de capacidad, se han calculado los niveles de servicio utilizando la metodología del Manual de Capacidad (2000) para vías urbanas. Atendiendo a la clasificación funcional y la categoría de diseño, las travesías se pueden clasificar como vías urbanas de clase II. Así, el parámetro para determinar el nivel de servicio es la velocidad media de recorrido. A partir de la demora media, se ha calculado la velocidad media de recorrido en cada condición

de capacidad. Se puede observar en la Tabla 2 que el nivel de servicio en capacidad varía entre D y F, por lo que los valores propuestos operan cerca de congestión. Consecuentemente, la definición de capacidad en función de la demora es precisa. Los resultados indican que al reducir la distancia entre elementos, las condiciones operacionales son peores. Es más, se llega incluso a flujo inestable con distancias de separación inferiores a 100 m. Por otro lado, los pasos elevados con pendiente superior presentan un nivel de servicio inferior al E.

### Lomos transversales

Como en los pasos elevados, la demora media se ha calculado sin considerar vehículos pesados. En la Figura 4 se muestra la demora media en los

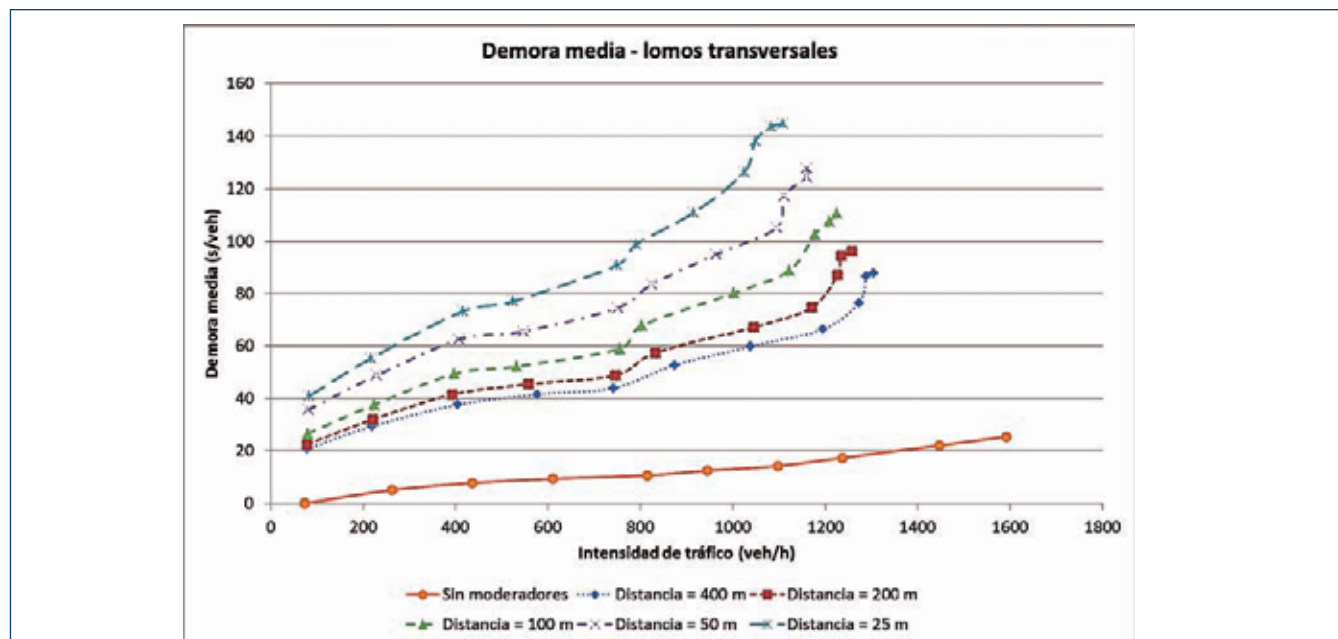


Figura 4: Demora media en lomos transversales.

Tabla 4: Porcentaje de reducción de capacidad en función de la composición.

| Distancia (m) | Porcentaje de vehículos pesados |     |
|---------------|---------------------------------|-----|
|               | 10%                             | 20% |
| Sin MDT       | -                               | -   |
| 400           | 2                               | 5   |
| 200           | 2                               | 5   |
| 100           | 3                               | 5   |
| 50            | 3                               | 8   |
| 25            | 4                               | 10  |

respecto a los escenarios con únicamente vehículos ligeros, que ya presentaban una notable reducción de capacidad. Además, se produce una mayor dispersión de los resultados al aumentar el porcentaje de vehículos pesados.

### Funcionalidad del Tráfico

La operación del tráfico se ha estudiado en función de la demora media por vehículos. A partir de los resultados (Figuras 2,3 y 4), se ha podido deducir que el espaciamiento es un parámetro clave en la demora media, de tal forma que para una demanda de tráfico constante, se pueden observar tres tendencias: sin moderadores del tráfico; con espaciamiento de 400, 200 y 100 m, y con una distancia entre elementos de 50 y 25 m. La diferencia existente entre los tres grupos es mayor conforme la demanda de tráfico se incrementa. Los escenarios con una Tabla 3. Capacidad de una travesía con lomos transversales separación entre 100 y 400 m tienen una operación del tráfico similar, luego la implementación de un único elemento tiene una influencia en el tráfico parecida a la que producirían elementos de moderación del tráfico espaciados 100 m, sin un incremento de la demora sustancial. Con un espaciamiento inferior a 100 m, se manifiesta un efecto de acumulación, en el que los elementos de moderación del tráfico funcionan como una única medida y no permiten a los conductores desarrollar la velocidad deseada entre ellos. En consecuencia, se pueden identificar dos espaciamientos críticos: 400 y 50 m. Además, se ha estudiado la operación del tráfico en función del volumen de tráfico en la red. En este análisis, se han identificado cuatro zonas claramente definidas que correlacionan la demora media y la intensidad de tráfico. Estas cuatro zonas definen distintos tipos de comportamiento del tráfico, y sus umbrales dependen del tipo de medida de moderación del tráfico y de la separación entre elementos. La primera

lomos transversales en función de la separación y la intensidad de tráfico. Los resultados se comparan con aquellos sin elementos de moderación del tráfico. La demora media, en el caso de los lomos transversales, es muy similar a la de los pasos elevados en el caso de distancia entre dispositivos superior a 200 m. A medida que se reduce dicho espaciamiento, los lomos transversales provocan una mayor reducción que los pasos elevados con pendiente menor al 5%, y, en consecuencia, una menor capacidad. La capacidad de las travesías con lomos transversales en función de la distancia entre lomos se resume en la Tabla 3. Se puede observar cómo la capacidad se reduce un 38% en la menor distancia entre dispositivos mientras que si la distancia entre elementos es de 400 m, dicha reducción es del 25%, y presenta una menor sensibilidad al espaciamiento que los pasos elevados. Como dicha sensibilidad es menor, en este caso sólo se considera un espaciamiento crítico: 400 m. Por lo tanto, la implementación de únicamente dos elementos de moderación del tráfico afecta ya a la capacidad reduciéndola en un 25%.

Al igual que con los pasos elevados, se ha calculado la velocidad media de recorrido para determinar el nivel de servicio asociado a la capacidad propuesta, obteniendo niveles de servicio D y E; luego se sigue confirmando la validez de la hipótesis de capacidad basada en el crecimiento exponencial de la demora. Como ocurría en los pasos elevados, el espaciamiento tiene un efecto en el nivel de servicio, de forma que al reducir el espaciamiento,

el nivel de servicio se reduce de B a D, incluso con dos únicos elementos separados 400 m.

### Efecto de los vehículos pesados

Los análisis anteriores se han realizado considerando únicamente vehículos ligeros. No obstante, habitualmente el porcentaje de vehículos pesados en las travesías varía entre el 0 y 15%, y suelen circular en las horas punta. Así, se han definido distribuciones de velocidad en el modelo para incluir también a los vehículos pesados. Además, se han introducido en el modelo de microsimulación datos específicos de vehículos pesados tipo en España como: longitud, anchura, peso, potencia, aceleración deseada, aceleración máxima, deceleración deseada y deceleración máxima, tanto para camiones como para autobuses. En este caso, se han empleado los pasos elevados con una pendiente de entrada inferior al 5% y cinco composiciones diferentes: 0, 5, 10, 15 y 20% de vehículos pesados. De forma similar a las simulaciones sin vehículos pesados, se ha obtenido la demora media y en función de esta, la capacidad de la travesía.

Los resultados se muestran en la Tabla 4. Con el fin de facilitar la comprensión de los mismos, se ha comparado la capacidad con y sin vehículos pesados en cada uno de los espaciamientos considerados. Se puede observar que la influencia de los vehículos pesados aumenta con el espaciamiento, y con el porcentaje de vehículos pesados. La disminución de capacidad varía entre el 2 y 10%

zona se produce para demandas de tráfico bajas, entre 0 y 400 veh/h, con un incremento rápido de la demora a medida que aumenta la demanda de tráfico, puesto que se están produciendo interacciones entre los vehículos que circulan a diferente velocidad y se generan turbulencias. El segundo comportamiento se presenta en condiciones por debajo de la capacidad de la vía. En ella, las interacciones entre los vehículos se reducen puesto que los conductores comienzan a encontrarse en la zona de flujo libre en el diagrama de velocidad-intensidad. El umbral de esta zona depende del tipo de moderador del tráfico: en el caso de los lomos transversales y los pasos elevados con una pendiente inferior al 5%, la zona se extiende hasta que el volumen de tráfico está entre 750 y 800 veh/h, y el valor no depende del espaciamiento. No obstante, el espaciamiento sí que condiciona el límite de la zona de flujo libre en los pasos elevados con una pendiente superior al 5%. En ellos, una distancia entre elementos de 25 m reduce la zona de flujo libre hasta los 600 veh/h, mientras que con un espaciamiento superior se extiende hasta 700-800 veh/h. A partir de la zona de flujo libre, se define una tercera zona hasta la capacidad, en la que la operación del tráfico se encuentra en la zona de flujo condicionado en la curva de velocidad-intensidad y se produce un aumento mayor en la demora en función de la demanda de tráfico. Este comportamiento se produce hasta que se excede la capacidad, a partir de la cual la demora crece exponencialmente.

La zona de flujo libre es la que usualmente se puede considerar como escenario de trabajo adecuado con elementos de moderación del tráfico y se asocia con un nivel de servicio C o D. Como se ha comentado anteriormente, la definición de la zona de flujo libre depende del tipo de moderador del tráfico. Se ha asumido que la intensidad horaria máxima para operar en condiciones de flujo libre es de 750 veh/h, puesto que la distancia en-

tre moderadores sea de 25 m sería excesivamente restringida. Así, se ha calculado el nivel de servicio asociado a una demanda de 750 veh/h para cada uno de los elementos y distancia entre ellos, obteniendo niveles de servicio C y D. En el caso de los pasos elevados con pendiente inferior al 5% y los lomos transversales, el nivel de servicio resultante con distancia entre elementos de 100, 200 y 400 m es C, mientras que en el resto de casos el nivel de servicio correspondiente es D. Si se considera la distribución diaria de tráfico típica en España, donde la hora punta representa entre el 12 y 17% del tráfico diario, se puede extrapolar el resultado horario a diario. En consecuencia, la intensidad diaria por carril y sentido para operar bajo condiciones de flujo libre varía entre 4500 y 6000 veh/día. Si se tienen en cuenta los dos sentidos de circulación de la travesía, la intensidad diaria máxima recomendada para implementar elementos moderadores del tráfico en una travesía está entre 9000 y 12000 veh/día. Este valor es considerablemente superior al establecido en la Instrucción de Fomento para elementos verticales, de 5000 veh/día, aunque es cercano a los indicados en otras normativas (CERTU, 2010; FHWA, 2009).

## 6. Conclusiones.

La moderación del tráfico es una medida de seguridad vial cuyo objeto es reducir los accidentes y la gravedad de los mismos al disminuir la velocidad y, en algunos casos, el volumen de tráfico. No obstante, los beneficios de la moderación del tráfico implican una reducción en la capacidad de las travesías y tiene efectos operacionales, que aún no habían sido investigados.

En el artículo se ha empleado un estudio de microsimulación de tráfico para analizar el efecto de las medidas de moderación del tráfico en travesías sobre la capacidad y la funcionalidad del tráfico, en función del tipo de moderador y la distancia entre dispositi-

vos. Para calibrar el modelo de microsimulación, se han observado cinco travesías de la provincia de Valencia mediante dispositivos rastreadores GPS en más de 900 vehículos. A partir de los datos tomados, se han deducido perfiles individuales de velocidad. Con estos perfiles, se ha calibrado y validado un modelo de microsimulación de tráfico implementado en VISSIM 5.1. Posteriormente, se han generado 396 escenarios con distintas características que no podrían haberse desarrollado en la realidad.

Con los resultados de los escenarios simulados, se ha evaluado la influencia de la separación entre dispositivos y el tipo de medida en la capacidad de las travesías. Para ello, se ha empleado la demora media, definiendo la capacidad de la vía como aquella intensidad de tráfico a partir de la cual la demora crecía exponencialmente. La validez de esta hipótesis se ha confirmado mediante la obtención del nivel de servicio asociado a la capacidad de la travesía, que variaba entre D y F. En cuanto a los valores de capacidad de la travesía, variaban entre 810 y 1300 veh/h para distancias entre elementos desde 25 a 400 m, siendo de 1150 veh/h en el caso de elementos separados 100 m. Con estos valores, la disminución de capacidad respecto a una travesía ideal se encuentra entre el 25 y 40%. Se han encontrado dos separaciones críticas, a partir de las que la capacidad varía significativamente: 400 y 50 m. Se puede observar cómo el efecto de los moderadores en la capacidad es similar con espaciamientos entre 100 y 400 m, luego la implantación de un único moderador del tráfico ya tiene una gran influencia en la capacidad de la vía. Por otro lado, distancias de separación inferiores a 50 m producen efecto de acumulación y funcionan ineficientemente, por lo que la capacidad se reduce apreciablemente.

La influencia de los pasos elevados y los lomos transversales en la capacidad también se ha comparado,

concluyendo que la capacidad es similar si los pasos elevados tienen una pendiente de entrada inferior al 5%. Los pasos elevados con mayor pendiente de entrada pueden reducir la capacidad incluso un 50% si se espacian 25 m. Por otra parte, se ha analizado la influencia de los vehículos pesados en la capacidad, encontrando que estos pueden reducir la capacidad entre un 2 y 10% respecto a la situación de sólo vehículos ligeros.

Por último, se ha estudiado la funcionalidad del tráfico en las travesías en función de la demora media por vehículo y se han detectado cuatro tipos de comportamiento. Una de las conclusiones más importantes del análisis es que, con intensidad de tráfico moderada, existe un nivel crítico de demanda de tráfico a partir de la cual la demora comienza a crecer de forma más rápida. Este nivel depende del tipo de moderador y de la distancia entre ellos, pero está cercano a los 700-800 veh/h. Con esta intensidad de tráfico, el nivel de servicio asociado es C para espaciamientos mayores a 100 m y D para espaciamientos de 25 y 50 m. Atendiendo a la distribución diaria de tráfico típica en España, la intensidad horaria máxima se puede extrapolar a la intensidad diaria. Así, la intensidad diaria máxima recomendada para implementar elementos moderadores del tráfico en una travesía está entre 9000 y 12000 veh/día, para asegurar el funcionamiento frecuente de la travesía en condiciones de flujo libre.

### Agradecimientos

La presente investigación ha sido posible gracias a la subvención del CEDEX del Ministerio de Fomento con Referencia PT-2007-052-23/APM. También se desea agradecer la colaboración de la Consellería de Infraestructuras y Transporte de la Generalitat Valenciana y de la Dirección General de Tráfico del Ministerio del Interior por la colaboración durante la toma de datos.

### Referencias

- [1] Abate, D., Dell'Acqua, G., Lambertini, R., y Coraggio, G. (2009). Use of Traffic Calming Devices along Major Roads thru Small Rural Communities in Italy. 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- [2] Barceló, J. et al. (2011). Fundamentals of Traffic Simulation, Ed. Springer, Nueva York.
- [3] CERTU (2010). Guide des coussins et plateaux, Lyon.
- [4] Dirección General de Obras Públicas de la Comunidad Valenciana (2004). Recomendaciones de la Dirección General de Obras Públicas para la ejecución de medidas de moderación de la velocidad en las travesías de las carreteras de la Comunidad Valenciana, Valencia.
- [5] Ewing, R. (1999). Traffic Calming: State of the Practice. Washington, DC: Institute of Transportation Engineers, US Department of Transportation.
- [6] Ewing, R., y Hodder, R. (2009). Best Development Practices. National Center for Smart Growth, University of Maryland.
- [7] Ewing, R., y Brown, S. (2009). U.S. Traffic Calming Manual. American Planning Association, Chicago.
- [8] Federal Highways Administration (2009). Engineering Countermeasures for Reducing Speeds: A Desktop Reference of Potential Effectiveness.
- [9] Fehr & Peers Transportation Consultants. Traffic Calming. <http://www.trafficcalming.org/>.
- [10] Fellendorf, M. y Vortisch, P. (2001). Validation of the microscopic traffic flow model VISSIM in different real-world situations. Transportation Research Board, Washington, DC.
- [11] García, A., Torres, A.J., Romero, M.A., y Moreno, A.T.. Speed profiles in cross-town roads with traffic calming measures. XVI Pan-American Conference of Traffic and Transportation Engineering and Logistics, Lisbon, 2010.
- [12] Hallmark, S., Knapp, K., Thomas, G., y Smith D. (2002) Temporary Speed Hump Impact Evaluation. Iowa Department of Transportation and the Center for Transportation Research and Education at Iowa State University
- [13] Hallmark, S.L., Hawkins, N., Fitzsimmons, E., Resler, J., Plazak, D., Welch, T., y E. Petersen (2008). Use of Physical Devices for Traffic Calming Along Major Roads thru Small Rural Communities in Iowa. Transportation Research Record, No. 2078, pp. 100-107.
- [14] Institute Of Transportation Engineers (2007). Guidelines for the Design and Application of Speed Humps- Washington DC. Publication Nº RP-038.
- [15] Ministerio de Fomento (2008). Instrucción Técnica para la Instalación de Reductores de Velocidad y Bandas Transversales de Alerta en Carreteras de la Red de Carreteras del Estado. Madrid.
- [16] Moreno, A.T., García, A., y Romero, M.A. (2011). Speed table evaluation and speed modeling in cross-town roads. Transportation Research Record (2203), 85-93.
- [17] Pau, M., y Angius, S. (2001). Do speed bumps really decrease traffic speed? An Italian experience. Accident Analysis and Prevention, Vol. 33, pp. 585-597.
- [18] Sanz, A. (2008). Calmar el Tráfico. Pasos para una nueva cultura de movilidad. Ministerio de Fomento. Madrid.
- [19] Transportation Research Board (TRB) (2000). Highway Capacity Manual, Washington, D.C.
- [20] Zech, W.C., Walker, D., Turochy, R.D., Shoemaker, A., y Hool, J. (2009). Effectiveness of Speed Tables as a Traffic Calming Measure on a College Campus Street. Presented at 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C. ♦