



Evaluación del Impacto Energético y Medio Ambiental de la Moderación de Tráfico en Travesías

Energetic and Environmental Impacts Assessment of Traffic Calming in Crosstown Roads

Ramón Silvestre Martínez
Personal investigador, Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC). Universitat Politècnica de València
Alfredo García García
Catedrático. GIIC. Universitat Politècnica de València

Resumen

Los sistemas moderadores del tráfico disminuyen la velocidad y el flujo de tráfico para mejorar la seguridad vial en travesías y vías urbanas, si bien en su diseño no se consideran los criterios de impacto energético y ambiental en el medio urbano.

Para estimar estos impactos inducidos por los elementos moderadores se ha desarrollado una metodología propia basada en datos de recorridos reales. Se ha aplicado un modelo de estimación microscópico que ha permitido obtener el consumo de combustible y la emisión de hidrocarburos, monóxido de carbono, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno en cinco travesías de la provincia de Valencia con diversos moderadores de tráfico.

Los resultados muestran que los elementos moderadores aumentan el consumo de carburante y las emisiones en las travesías de estudio. En particular, en los elementos moderadores del tipo paso de peatones elevado se concluye que el impacto energético y ambiental depende en mayor medida de la disposición de los elementos dentro del sistema moderador de tráfico, que de las características geométricas individuales de los mismos.

Los resultados obtenidos permiten incorporar los principios de sostenibilidad a los ya existentes de funcionalidad del tráfico y seguridad vial en el diseño de sistemas para la moderación del tráfico urbano.

PALABRAS CLAVE: Moderación de tráfico, travesía, consumo de carburante, emisiones, impacto ambiental, contaminación atmosférica.

Abstract

Traffic calming reduces traffic speed and traffic flow in crosstown roads and urban streets to improve road safety. However, its design does not consider energy and environmental impact criteria in urban areas.

In order to estimate both energy and environmental impacts induced by traffic calming measures, a methodology based on naturalistic driving was developed. Then, a microscopic estimation model was applied to obtain fuel consumption and emissions of: hydrocarbons; carbon monoxide; carbon dioxide; and nitrogen oxides in five crosstown roads of Valencia with different traffic calming measures.

The results show that traffic calming measures increase fuel consumption and emissions in the studied crosstown roads. Specifically, it was found that energy and environmental impacts of speed tables depends on the layout of the elements within the traffic calming system, rather than geometric characteristics of each individual traffic calming measure.

The obtained results allow us to incorporate sustainability principles to urban traffic systems. Consequently, not only functionality or road safety but also environmental impacts of traffic calming could be considered.

KEY WORDS: Traffic calming, crosstown road, fuel consumption, emission, environmental impact, air pollution.

Introducción

La actual complejidad de las infraestructuras y servicios del transporte que dan soporte a las relaciones socio-económicas de la sociedad condiciona el desarrollo de soluciones para la mejora de la seguridad vial. La eliminación, reducción y control de las situaciones que comprometen la seguridad vial y peatonal, así como la adecuada gestión del tráfico para evitar la congestión y los viajes innecesarios, se establecen como criterios básicos, particularmente en las zonas urbanas.

Cada vez es más frecuente la implementación de medidas de moderación del tráfico en travesías para reducir tanto la frecuencia como la gravedad de los accidentes, mediante la moderación de la velocidad e intensidad del tráfico. Sin embargo, actualmente el diseño de sistemas moderadores de tráfico no considera el impacto energético y medio ambiental como factor de diseño.

La implantación de sistemas moderadores de tráfico en travesías condiciona al conductor a que modere su velocidad, rompiendo la continuidad de la vía interurbana y forzando la adaptación al entorno urbano. Esta adaptación ocasiona ciclos de deceleración o disminución de potencia y de aceleración o demanda de potencia, que repercuten en el consumo de carburante y, consecuentemente, en la emisiones de los vehículos.

La polución ocasionada por el tráfico en zonas con moderadores provoca emisiones directas de contaminantes a la atmósfera urbana, tales como dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC), así como contaminantes secundarios, resultado de reacciones fotoquímicas, que pueden afectar gravemente a la salud humana (Dab et al., 2001; Hoek et al., 2002) [1,2], especialmente en vías que soportan un gran volumen de tráfico y con poca ventilación.

Por otro lado, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y la formación de ozono (O_3) como consecuencia de reacciones en las emisiones anteriormente descritas, son dos de los gases de efecto invernadero más importantes.

Considerando que la emisión de gases provocada por el tráfico rodado es la fuente principal de polución en zonas urbanas



Figura 1. Paso peatonal elevado en Quatretonda (Valencia)

(Colville et al., 2001) [3], cabe estudiar el efecto de los elementos moderadores y su influencia sobre dichas emisiones.

En particular, se han estudiado los elementos moderadores de tipo paso peatonal elevado (figura 1), que destacan como las medidas de moderación de tráfico más frecuentes, y se caracterizan por poseer un perfil trapezoidal y permitir el paso de peatones sobre ellos.

Antecedentes

Numerosos estudios han relacionado la utilización de elementos moderadores de tráfico con reducciones de velocidad y de accidentes en travesías, así como de la gravedad de los mismos. Sin embargo, los estudios relativos acerca del impacto de los elementos moderadores sobre el consumo de combustibles y las emisiones consiguientes son relativamente reducidos.

Durante la década de los 90, las investigaciones realizadas respecto a los efectos de la moderación del tráfico sobre el consumo de carburante y las emisiones del tráfico son reducidas, caracterizándose por el aporte de conclusiones variadas y, en ocasiones, contrapuestas.

En la última década, la incorporación de los criterios de sostenibilidad a nivel global ha producido una mayor profusión de estudios en este ámbito.

Así, según Boulter et al. (2001) [4], las medidas de moderación del tráfico aumentan las emisiones de algunos contaminantes producidos por vehículos ligeros. En particular, para vehículos de gasolina sin catalizador, con catalizador y diesel, la

media de emisiones de CO por vehículo y kilómetro recorrido aumentaba en un 34%, 59% y 39%, respectivamente. Las emisiones de NO_x de los vehículos de gasolina aumentaban sólo ligeramente, pero en los vehículos diesel se incrementó en un 30%, siendo este aumento más acusado a mayor severidad en la medida de moderación.

Según un estudio realizado por Daham (2005) [5], mediante pruebas de experimentación de un vehículo ligero de gasolina tipo Euro I, con una serie de reductores de velocidad en una carretera y un medidor portátil tipo *Fourier Transform Infrared (FTIR)*, se determinó que la moderación del tráfico provocaba un aumento de las emisiones de CO_2 (90%), CO (117%), NO_x (195%) y HC (148%).

Recientemente, Ahn y Rakha estudiaron el efecto de los moderadores de tráfico mediante la utilización de sistemas GPS para la recogida de datos, antes y después de su implantación. Los resultados obtenidos demostraban que las gloriets y reductores de velocidad producían un aumento significativo de emisiones de los vehículos. En particular, los resaltos provocaron un aumento del 51%, 44%, 110%, y 52% de HC , CO , NO_x y CO_2 , respectivamente. Por tanto, se consideró que el uso de sistemas moderadores de tráfico aumentaba el consumo de combustible y las emisiones (Ahn et al., 2009) [6].

Por otro lado, se estableció que una homogeneización en la velocidad de circulación disminuye de forma apreciable las emisiones y el consumo de combustible, ya que se reducen los cambios de regímenes de funcionamiento del motor, aunque en con-

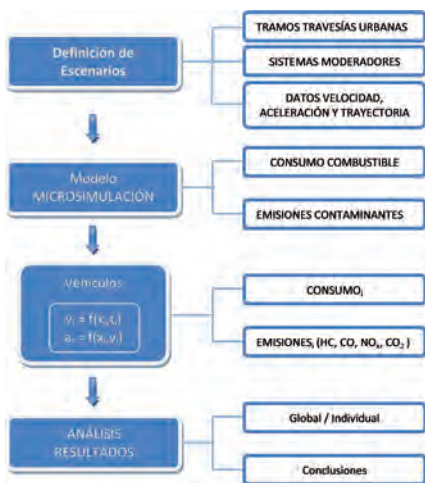


Figura 2. Esquema resumen de la metodología de estudio

diciones de flujo libre esta disminución no es tan significativa (García et al., 2009) [7].

Por tanto, las últimas investigaciones concluyen que la implantación de un sistema de moderadores de tráfico en una travesía, donde anteriormente el flujo libre estaba únicamente condicionado por la limitación de la velocidad, puede ocasionar deceleraciones y aceleraciones en los vehículos, produciendo un aumento en las tasas de consumo de carburante y emisiones.

Objetivos

El objetivo principal del estudio es el diseño y aplicación de una metodología para caracterizar el consumo de carburante y emisiones asociado a los sistemas moderadores de tráfico, y en particular a pasos elevados, a partir de datos de conducción naturalística y un modelo de estimación a escala microscópica.

Englobados dentro de este objetivo principal, se pueden definir como objetivos secundarios la caracterización del comportamiento de los conductores en travesías con sistemas de moderación a través de rastreadores GPS, la aplicación de la metodología propuesta a los perfiles individuales de velocidad y aceleración, y el análisis del impacto energético y ambiental en función

de las características de las travesías y de los propios elementos moderadores de tráfico. Además, se pretende evaluar la influencia de factores sociológicos del conductor como el género y la edad.

Metodología

En la metodología desarrollada cada travesía constituye un escenario específico analizado respecto a su localización, condiciones del entorno, elementos moderadores del tráfico existentes y demás factores que puedan incidir significativamente en la evaluación del consumo de carburante y de las emisiones en estudio.

La metodología desarrollada se estructura según las etapas que se definen en los apartados siguientes y que quedan esquematizadas en la figura 2.

Definición de escenarios

Los escenarios de estudio se corresponden con tramos de travesía, caracterizados por tener una intensidad horaria media por sentido de circulación superior a 30 veh/h, intensidades medias diarias (IMD) entre 2 450 y 4 230 veh/día, longitud suficiente para evitar alcances entre los vehículos y mantener la circulación en flujo libre, así como por la presencia de elementos moderadores del tráfico (MDT).

Los tramos de travesía seleccionados son los correspondientes a los municipios de Albalat de la Ribera, Chelva, Genovés, Llutxent y Quatretonda, todos ellos en la provincia de Valencia.

Con el fin de caracterizar las travesías, se define la densidad de moderadores del tráfico (DMDT) como el número de moderadores de tráfico por unidad de longitud. Para su cálculo se han considerado así mismo los elementos funcionando como puertas de entrada a la travesía, mayorados a efectos de cálculo de la densidad con un

factor de 1,5. Asimismo, también se consideran las curvas con un radio inferior a 150 m, que suponen un control de velocidad por debajo de 50 km/h.

En cuanto a los elementos moderadores existentes, en total se registraron 16 pasos de peatones elevados y 5 lomos transversales. En la tabla 1 se recogen las características principales de cada una de las travesías o escenarios de las observaciones.

Toma de datos

La toma de datos se realizó en el marco del proyecto de investigación MODETRA "Metodología para el diseño e implantación de sistemas de moderación de tráfico", mediante el uso de rastreadores pasivos GPS que registraron la posición de cada vehículo cada segundo, durante períodos matinales de 8:30 a 14:00, en días laborables y buenas condiciones meteorológicas (Moreno et al., 2011) [8].

Sobre la base de la trayectoria media se obtuvieron tiempo, posición, velocidad instantánea y aceleración de cada vehículo, tomando un intervalo determinado de metros. La precisión de los dispositivos GPS utilizados, en la posición absoluta, es de 2,5 m, realizándose un proceso de depuración dirigido a mejorarla, dando continuidad al comportamiento y a la trayectoria de cada vehículo.

Las características geométricas de los pasos peatonales elevados, que se recogen en la tabla 2, fueron medidas in situ, utilizando un perfilómetro digital, con una precisión de 1/8 de milímetro, desarrollado específicamente para el proyecto MODETRA, con el fin de correlacionar las dimensiones de los elementos moderadores del tráfico con el comportamiento de los conductores. Cabe destacar que la falta de normalización en España en el pasado se hace patente en la gran dispersión de las características geométricas de los elementos construidos in situ.

Tabla 1. Características de los escenarios de observación

Escenario	Límite de velocidad (km/h)	IMD (vh/d)	Longitud (m)	Curvas (ud)	MDT (ud)	Puerta de entrada (ud)	DMDT (ud/km)	
							Sentido ida	Sentido vuelta
Albalat	40	4 230	765	1	5	0	7,8 (E)	7,8 (O)
Chelva	40	2 490	885	1	4	0	5,6 (O)	5,6 (E)
Genovés	40	4 550	945	2	4	1	7,4 (E)	6,3 (O)
Quatretonda	50	3 250	680	0	4	0	5,9 (E)	5,9 (O)
Llutxent	40	2 930	690	0	4	0	5,8 (E)	5,8 (O)

Reducción de datos

A partir de los perfiles continuos de velocidad y aceleración obtenidos a lo largo de cada travesía y para cada vehículo, y de los correspondientes datos sociológicos, se realizó la reducción de datos mediante técnicas de análisis selectivo.

Se seleccionaron los vehículos circulando en flujo libre, con intervalos de tiempo superior a 3 segundos entre el mismo y el vehículo precedente, mediante un análisis gráfico, comparando el perfil de velocidades individual de cada vehículo con los

globales correspondientes a los percentiles 15, 50 y 85. Así, un perfil individual de velocidades por debajo del percentil 15 o por encima del percentil 85 indica una velocidad inusual, posiblemente debida a una circulación condicionada por otro vehículo o por peatones. Los vehículos condicionados excluidos resultaron ser aproximadamente el 30% de la muestra inicial.

Por otro lado, se eliminaron los perfiles incompletos o con presencia de datos erróneos, resultando una muestra final para el análisis de 448 perfiles individuales de vehículos.

Modelo microscópico de estimación

El modelo de estimación del consumo de carburante y emisiones utilizado fue el modelo microscópico VT-Micro, desarrollado por el Centro de Movilidad Sostenible del Instituto Tecnológico de Transportes de Virginia.

El modelo VT-MICRO (Rakha et al., 2004) [9], ha sido desarrollado utilizando técnicas de regresión a partir de la experimentación con numerosas combinaciones de los niveles de velocidad y aceleración para

Tabla 2. Resumen de las características geométricas de los pasos elevados

ID.	Localización	DMA (m)	DMS (m)	L (cm)	LE (cm)	LC (cm)	LS (cm)	Hmax (cm)	PV (%)	PE (%)	PS (%)
PE 1	Genovés	60	90	724	149	414	161	8,0	0,92	3,38	4,41
PE 2	Genovés	90	60	724	149	414	161	8,0	0,92	4,41	3,38
PE 3	Genovés	100	145	783	224	337	222	11,9	-0,84	4,63	4,48
PE 4	Genovés	145	100	783	224	337	222	11,9	-0,84	4,48	4,63
PE 5	Genovés	145	130	818	191	463	164	10,7	1,44	3,67	5,40
PE 6	Genovés	130	145	818	191	463	164	10,7	1,44	5,40	3,67
PE 7	Llutxent	380	165	789	202	385	202	9,0	-5,3	3,81	4,17
PE 8	Llutxent	165	380	789	202	385	202	9,0	-5,3	4,17	3,81
PE 9	Llutxent	165	105	808	223	345	240	9,8	-5,48	4,13	4,12
PE 10	Llutxent	105	165	808	223	345	240	9,8	-5,48	4,12	4,13
PE 11	Llutxent	105	155	767	224	320	223	8,5	-5,5	3,19	4,13
PE 12	Llutxent	155	105	767	224	320	223	8,5	-5,5	4,13	3,19
PE 13	Llutxent	155	450	804	215	388	201	12,9	-2,64	5,59	4,52
PE 14	Llutxent	450	155	804	215	388	201	12,9	-2,64	4,52	5,59
PE 15	Quatretonda	30	115	651	151	372	129	6,1	0,98	3,56	3,59
PE 16	Quatretonda	115	30	651	151	372	129	6,1	0,98	3,59	3,56
PE 17	Quatretonda	115	100	743	146	395	201	10,6	2,05	5,40	4,92
PE 18	Quatretonda	100	115	743	146	395	201	10,6	2,05	4,92	5,40
PE 19	Quatretonda	100	95	676	158	292	227	10,3	1,76	6,08	4,42
PE 20	Quatretonda	95	100	676	158	292	227	10,3	1,76	4,42	6,08
PE 21	Quatretonda	95	500	691	143	388	160	10,6	2,77	6,21	6,23
PE 22	Quatretonda	500	90	691	143	388	160	10,6	2,77	6,23	6,21
PE 23	Albalat	110	100	682	152	360	170	10,5	0,20	6,75	6,00
PE 24	Albalat	100	110	682	152	360	170	10,5	0,20	6,00	6,75
PE 25	Albalat	100	270	689	152	378	159	10,3	-0,54	6,54	7,26
PE 26	Albalat	270	100	689	152	378	159	10,3	-0,54	7,26	6,54
PE 27	Chelva	120	125	586	140	319	128	9,4	0,13	6,54	7,26
PE 28	Chelva	125	120	586	140	319	128	9,4	0,13	7,26	6,54
PE 29	Chelva	125	275	637	108	364	166	8,7	0,03	6,64	5,62
PE 30	Chelva	275	125	637	108	364	166	8,7	0,03	5,62	6,64
PE 31	Chelva	275	250	652	113	364	176	8,6	-4,28	4,41	5,87
PE 32	Chelva	250	275	652	113	364	176	8,6	-4,28	5,87	4,41

DMA: Distancia al moderador de tráfico anterior
DMS: Distancia al moderador de tráfico siguiente
L: Longitud del paso
LE: Longitud de la rampa de entrada

LC: Longitud de la meseta central
LS: Longitud de la rampa de salida
Hmáx: Altura máxima
PV: Pendiente de la vía

PE: Pendiente de la rampa de entrada
PS: Pendiente de la rampa de salida

$$MOE_s = \begin{cases} \exp \left(\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (L_{ij}^+ u^i \cdot a^j) \right) & \text{para } a \geq 0 \\ \exp \left(\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 (M_{ij}^+ u^i \cdot a^j) \right) & \text{para } a < 0 \end{cases}$$

MOE_s : matriz de estimación de tasas de consumo (l/s) y emisiones (g/s)

L_{ij}^+ : coeficientes de regresión, para i^{th} valores de velocidad y j^{th} valores de aceleraciones positivas

u : velocidad instantánea (km/h)

M_{ij}^+ : coeficientes de regresión para i^{th} valores de velocidad y j^{th} valores de aceleraciones negativas

a : aceleración instantánea del vehículo (m/h/s)

Figura 3. Modelo VT-Micro de estimación de consumo de carburante y emisiones

construir un modelo de doble régimen, según se establece en la ecuación de la figura 3.

Para la aplicación del modelo se llevó a cabo la clasificación previa de los vehículos según las distintas categorías de vehículos ligeros de pasajeros (LDV1, LDV2, LDV3, LDV4) y vehículos industriales ligeros (LDT 1, LDT 2). Para ello, a partir de los datos de marca y modelo del vehículo, así como de su matrícula, se obtuvo la tipología del mismo, el rango de tamaño de motor aproximado, el año de fabricación del mismo y el

kilometraje aproximado en función de su antigüedad.

La entrada de datos del modelo se realiza según los perfiles individuales en función del tiempo de viaje (s), velocidad instantánea (km/h) y aceleración instantánea (km/h/s), obteniéndose tras su aplicación los perfiles individuales correspondientes al consumo de carburante (l/s) y emisiones de HC, CO, NOx y CO₂ (g/s).

Posteriormente, se calculan los valores totales acumulados de consumo (l) y emi-

siones (g) a lo largo de todo el trayecto, así como las tasas instantáneas de consumo de carburante (l/100 km) y emisiones (g/km) de cada vehículo a lo largo del recorrido y para el conjunto de la muestra, correspondiente al percentil 50 de los valores instantáneos calculados.

Resultados y análisis

Características de las muestras

Los vehículos ensayados son principalmente vehículos de tipo turismo (67%), además de vehículos tipo furgoneta (22%). Según la clasificación requerida por el modelo de microsimulación, en los escenarios se da una presencia mayoritaria de vehículos ligeros de pasajeros tipo LDV3 (42%) y LDV4 (34%), representando los vehículos ligeros industriales (LDT) el 23% de la muestra total.

Respecto del género y edad de los conductores, la mayor parte de los identificados se corresponde con hombres (82%), siendo las mujeres un porcentaje minoritario en la muestra (16%). El grupo de edad mayoritario es el de 36 a 60 años (48%), seguido del grupo comprendido entre los 18 y los 35 años (33%). El porcentaje de conductores de más de 60 años resulta reducido (18%).

Tasas de consumo de carburante y emisiones en las travesías

Mediante la aplicación del modelo de estimación a cada uno de los perfiles individuales se obtienen los valores, tanto instantáneos como acumulados, para cada vehículo de la muestra, sentido de circulación y travesía, así como los valores medios globales. En la figura 4 se representan los resultados de la travesía de Albalat de la Ribera.

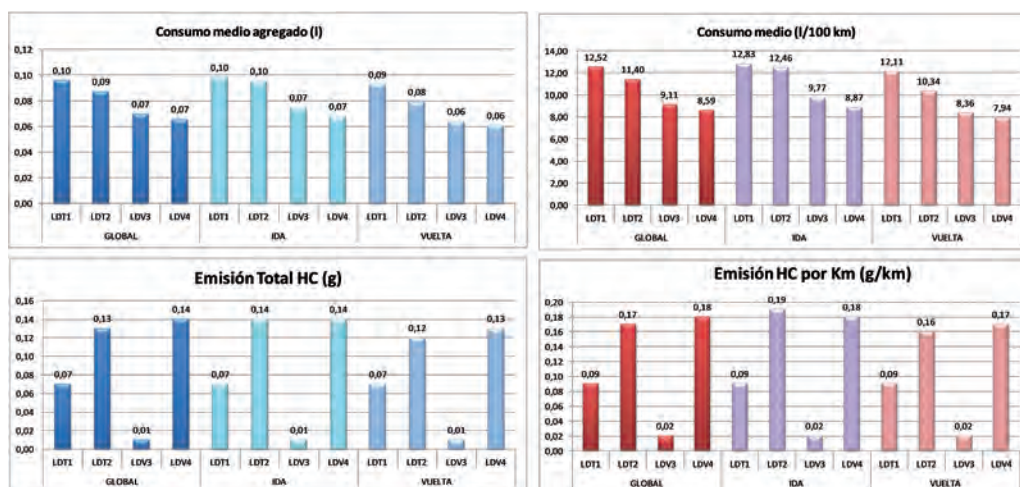


Figura 4. Valores acumulados y tasas de consumo de carburante y emisiones de hidrocarburos por tipo de vehículo en la travesía de Albalat de la Ribera

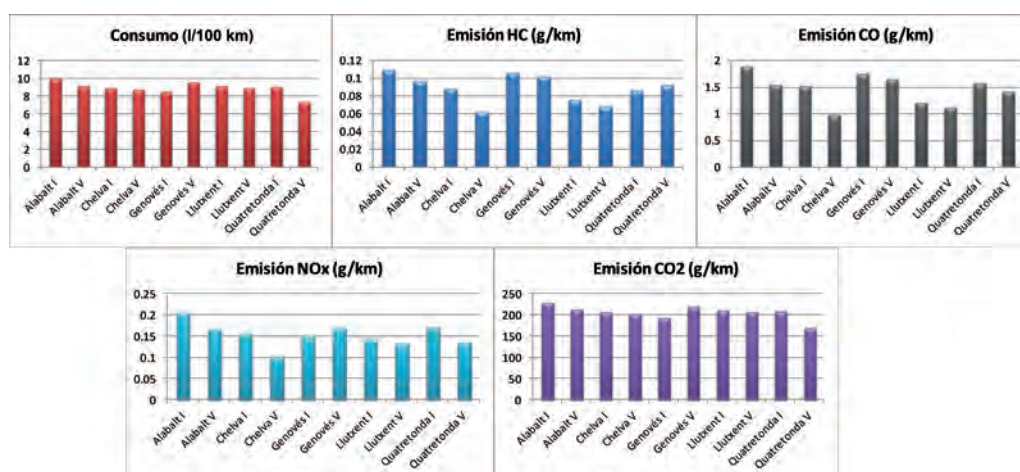


Figura 5. Tasas de consumo de carburante y emisiones por sentidos de circulación (I: Ida, V: Vuelta) en cada travesía

La *tabla 3* y la *figura 5* resumen las tasas medias globales para el conjunto de vehículos de cada muestra, obtenidas en cada travesía observada y por cada sentido de circulación.

Los valores medios para el conjunto de la muestra resultan de una velocidad media de 38,2 km/h, aceleración media positiva de 0,47 m/s², tasa de consumo de combustible de 9,51 l/100 km y tasas de emisiones de HC, CO, NOx y CO₂ de 0,11, 2,27, 0,21 y 217,93 g/km, respectivamente.

Se ha realizado el análisis de la varianza (ANOVA) para las variables de estudio, bajo la hipótesis de poblaciones normales, homocedasticidad respecto a las varianzas de las poblaciones y muestras independientes. Este análisis estadístico se aplica teniendo en cuenta cada escenario y sentido de circulación, determinando si la media de cada una de las poblaciones puede ser estadísticamente la misma que la media del resto de poblaciones. Puesto que los valores-P para cada variable han resultado menores que 0,05, la hipótesis nula se debe rechazar, con un nivel de confianza del 95%, por lo que la variable observada resulta estadísticamente significativa entre los distintos escenarios.

Ciclos de conducción

Se han representado gráficamente las variables de estudio, para cada escenario y sentido de circulación, a fin de analizar y caracterizar la influencia de los elementos moderadores sobre el consumo de carburante y las emisiones instantáneas. Para ello se disponen en abscisas la longitud recorrida a lo largo de la travesía, en metros, y en ordenadas las variables de estudio: velocidad (km/h), aceleración (m/s²), consumo de combustible (l/s) y las tasas de emisión de HC, CO, NOx y CO₂ (g/s).

Mediante análisis gráfico, han sido de-

Tabla 3. Resumen de tasas medias de consumo y emisión por travesías

Travesía	Nº vehículos	Vm (km/h)	AMP (m/s ²)	Consumo (l/100 km)	HC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	CO ₂ (g/km)
Albalat de la Ribera	78	34,9	0,46	9,60	0,10	1,71	0,19	221,71
Ida	45	34,7	0,47	9,98	0,11	1,88	0,21	230,23
Vuelta	33	35,1	0,46	9,22	0,10	1,54	0,17	213,19
Chelva	91	36,8	0,38	8,85	0,08	1,25	0,13	204,97
Ida	46	36,6	0,38	8,98	0,09	1,51	0,16	207,32
Vuelta	45	37,1	0,38	8,73	0,06	0,98	0,10	202,62
Genovés	135	33,4	0,37	9,06	0,10	1,70	0,16	207,84
Ida	75	34,1	0,37	8,49	0,11	1,76	0,15	194,47
Vuelta	60	32,6	0,37	9,63	0,10	1,65	0,17	221,21
Llutxent	112	37,9	0,35	9,05	0,07	1,16	0,14	209,87
Ida	50	36,8	0,34	9,18	0,08	1,20	0,15	212,76
Vuelta	62	39,1	0,37	8,93	0,07	1,11	0,13	206,97
Quatretonda	73	40,7	0,33	8,24	0,09	1,49	0,15	190,17
Ida	32	39,4	0,38	9,10	0,09	1,57	0,17	210,18
Vuelta	41	42,0	0,29	7,37	0,09	1,41	0,14	170,15

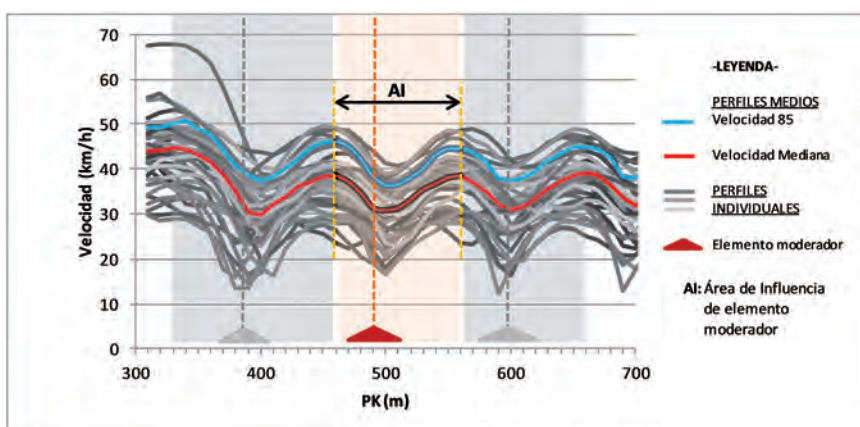


Figura 6. Determinación de las áreas de influencia de cada moderador

terminadas las zonas de influencia de los elementos moderadores. Para ello, se representa el percentil 85 de la distribución de velocidades en cada escenario y sentido de circulación. El punto de inflexión de la curva de velocidades anterior al elemento moderador corresponde con aquel en el que el 85% de los conductores perciben dicho elemento, produciéndose un decremento de la velocidad (*figura 6*). Una vez superado el elemento moderador, se produce un in-

cremento de la velocidad de los vehículos, que finaliza en el punto de inflexión donde la velocidad comienza a disminuir por efecto del moderador siguiente. La longitud de la travesía delimitada por dichos puntos de inflexión, anterior y posterior al elemento moderador, corresponde con la máxima amplitud del valle de distribución de velocidades y determina el área de influencia del elemento moderador.

La *figura 7* muestra los perfiles obteni-

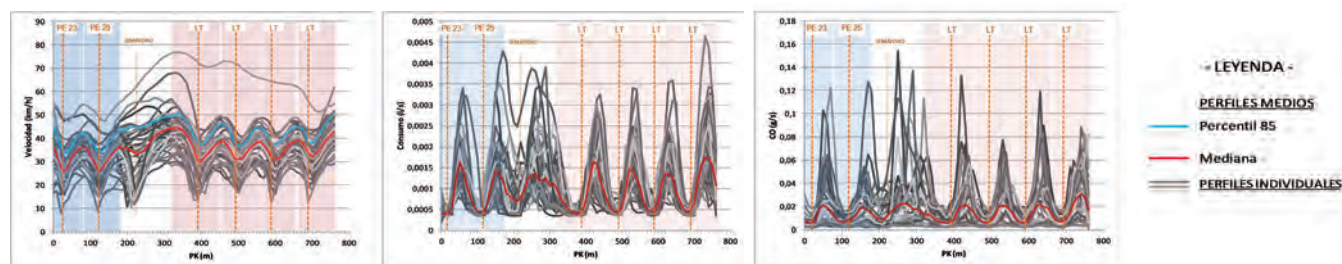


Figura 7. Perfiles de consumo de carburante y emisiones en Albalat de la Ribera, sentido ida (E)

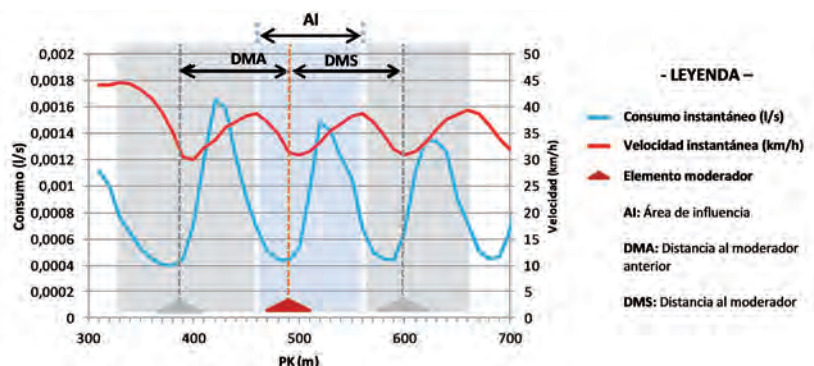


Figura 8. Caracterización del efecto de los elementos moderadores

dos para la velocidad, consumo de carburante y emisión de monóxido de carbono a lo largo de la travesía de Albalat de la Ribera, así como las áreas de influencia de los elementos moderadores existentes.

Evaluación de los pasos de peatones elevados

El comportamiento de la tasa de consumo instantáneo respecto de la ubicación de los moderadores se caracteriza por un descenso en el consumo desde que se inicia el proceso de deceleración, bien sea por percepción de un elemento moderador o por un cambio de condiciones de entorno, seguido de un aumento brusco una vez superado este (figura 8). Este aumento brusco se debe a que los conductores, una vez reducida la velocidad para superar el elemento moderador, tienden a intentar recuperar rápidamente este diferencial de velocidad perdido, si las condiciones del entorno lo permiten. La tasa de emisión de CO_2 se comporta de manera similar al consumo.

El comportamiento de las tasas de emisiones de HC, CO y NO_x se generaliza en un aumento de las mismas una vez superado el moderador, aunque en distinto grado, cuando se produce la aceleración del vehículo para recuperar velocidad.

Estos comportamientos están condicionados por las distancias entre moderadores consecutivos, variando según la densidad de moderadores de tráfico en la travesía.

Se ha identificado el área de influencia media de cada moderador en cada sentido, calculando el consumo y las emisiones asociadas a cada paso elevado y para cada vehículo, obteniendo las tasas medias de consumo y emisión asociadas a cada moderador (tabla 4).

Se ha constatado la relación entre consumo de carburante asociado a un determinado

paso elevado con las distancias del mismo a los elementos moderadores anterior y siguiente, así como a la densidad del sistema moderadores de tráfico. La emisión de CO_2 se relaciona igualmente con dichas variables.

Por otro lado, la tasa de emisión de CO se relaciona únicamente con la distancia al elemento moderador anterior y con la densidad de moderadores. En las tasas de emisión de HC y NO_x se observa cierta relación con la densidad de moderadores y la distancia al moderador anterior, respectivamente, si bien los modelos diseñados explican un porcentaje muy reducido de la variabilidad de las tasas.

En la tabla 5 se relacionan los modelos de mejor ajuste encontrados para la estimación de las distintas variables dependientes contempladas. En ningún caso se encontró significancia estadística para la incorporación como variables independientes de al-

Tabla 4. Tasas medias de consumo y emisión asociadas a cada paso elevado de las travesías de estudio y en cada sentido de circulación

ID.	Localización	V _{media} (km/h)	Tasas medias					DMDT (ud/km)
			Consumo (l/100 km)	HC (g/km)	CO (g/km)	NO_x (g/km)	CO_2 (g/km)	
PE 1	Genovés	32,47	11,65	0,16	2,31	0,25	268,51	7,40
PE 2	Genovés	33,69	8,60	0,09	1,35	0,08	197,62	6,30
PE 3	Genovés	33,63	9,49	0,13	1,98	0,16	217,96	7,40
PE 4	Genovés	31,77	9,04	0,10	1,46	0,14	207,24	6,30
PE 5	Genovés	33,21	9,54	0,13	1,87	0,16	219,57	7,40
PE 6	Genovés	31,78	9,10	0,09	1,21	0,09	212,25	6,30
PE 7	Llutxent	37,20	8,83	0,07	1,04	0,08	206,18	5,80
PE 8	Llutxent	39,65	10,60	0,03	0,81	0,12	247,52	5,80
PE 9	Llutxent	36,29	9,75	0,07	1,05	0,13	225,60	5,80
PE 10	Llutxent	37,04	10,08	0,03	0,76	0,10	234,58	5,80
PE 11	Llutxent	34,48	9,60	0,07	1,08	0,13	223,43	5,80
PE 12	Llutxent	37,49	8,83	0,02	0,52	0,08	204,01	5,80
PE 13	Llutxent	35,99	10,42	0,08	1,16	0,15	240,74	5,80
PE 14	Llutxent	39,10	8,78	0,03	0,61	0,08	203,42	5,80
PE 15	Quatretonda	35,43	9,78	0,08	1,14	0,15	228,43	5,90
PE 16	Quatretonda	36,23	9,14	0,11	1,56	0,17	208,91	5,90
PE 17	Quatretonda	36,11	10,29	0,08	1,29	0,18	239,08	5,90
PE 18	Quatretonda	36,91	8,84	0,15	1,98	0,18	203,25	5,90
PE 19	Quatretonda	36,98	10,81	0,08	1,32	0,20	249,51	5,90
PE 20	Quatretonda	39,33	8,15	0,10	1,39	0,12	188,12	5,90
PE 21	Quatretonda	45,74	11,65	0,08	1,57	0,26	272,13	5,90
PE 22	Quatretonda	48,74	6,70	0,09	1,24	0,06	153,33	5,90
PE 23	Albalat	31,49	11,13	0,11	1,73	0,23	259,95	7,80
PE 24	Albalat	31,25	11,46	0,11	1,61	0,16	265,37	7,80
PE 25	Albalat	31,71	11,17	0,11	1,64	0,15	256,05	7,80
PE 26	Albalat	34,50	8,72	0,09	1,39	0,12	203,28	7,80
PE 27	Chelva	27,71	10,39	0,10	1,32	0,15	240,91	5,60
PE 28	Chelva	31,79	9,24	0,02	0,47	0,05	213,77	5,60
PE 29	Chelva	36,19	9,69	0,08	1,34	0,18	226,37	5,60
PE 30	Chelva	36,82	8,08	0,02	0,41	0,05	188,32	5,60
PE 31	Chelva	39,58	9,79	0,08	1,17	0,15	223,20	5,60
PE 32	Chelva	37,99	9,03	0,02	0,49	0,08	211,00	5,60

Tabla 5. Tasas medias de consumo y emisión asociadas a cada paso elevado de las travessías de estudio y en cada sentido de circulación

Variable	Modelo	R ² (1)
Consumo CC (l/100km)	$CC = 6,71029 - 0,00529817 \cdot DMA + 0,00470484 \cdot DMS + 0,484995 \cdot DMDT$	55%
Emisión CO ₂ (g/km)	$CO_2 = 156,15 - 0,123388 \cdot DMA + 0,112915 \cdot DMS + 11,0194 \cdot DMDT$	55%
Emisión CO (g/km)	$CO = -0,202833 - 0,00600686 \cdot DMA + 0,00000925468 \cdot DMA^2 + 0,33527 \cdot DMDT$	51%
Emisión HC (g/km)	$HC = -1,9617 + 0,595454 \cdot DMDT - 0,0422705 \cdot DMDT^2$	45%
Emisión NO _x (g/km)	$NO_x = 0,181095 - 0,000264899 \cdot DMA$	26%

DMA: Distancia al moderador anterior (m) DMDT: Densidad de moderadores de tráfico (ud/km)
DMS: Distancia al moderador siguiente (m) (1) Coeficiente de determinación múltiple ajustado

guna de las características geométricas de los pasos elevados.

Bajo la hipótesis de que el diseño óptimo en travessías de doble sentido se produce con elementos moderadores equidistantes, se plantea un escenario teórico donde se distribuyen pasos peatonales elevados de manera uniforme a lo largo del mismo. En este escenario, y a partir de los modelos obtenidos, se estudian las variables consumo de carburante (CC) y emisión de monóxido de carbono (CO), teniendo en cuenta que el resto de variables de los modelos se expresan en función de la distancia entre moderadores.

En este escenario teórico se obtiene que el consumo de carburante (CC) se estabiliza a partir de una distancia entre moderadores comprendida entre 100 y 120 m, con tasas de consumo de carburante de 11,5 y 10,7 l/100 km respectivamente, donde la variación de la pendiente (δ_{cc}) de la curva de consumo es menor o igual que el 1% ($\Delta\delta_{cc} \leq 1\%$), según se muestra en la figura 9a.

Respecto a la emisión de monóxido de carbono (CO), esta se estabiliza en el intervalo comprendido entre 110 y 120 m, con emisiones comprendidas entre 2,3 y 2,0 g/km, donde la variación de la pendiente (δ_{co}) de la curva de emisión de CO es menor o igual que el 1% ($\Delta\delta_{co} \leq 1\%$), según se muestra en la figura 9b.

Por tanto, en travessías de doble senti-

do de circulación, la equidistancia mínima para lograr un decremento sustancial del consumo de carburante y de las emisiones de CO, debe estar comprendida entre los 110 y 120 m.

La equidistancia máxima entre moderadores queda acotada principalmente por criterios de funcionalidad y seguridad vial, si bien se debe considerar que separaciones elevadas influyen en el comportamiento de los conductores, produciendo ciclos de aceleración prolongados y deceleraciones bruscas ante el siguiente moderador, aumentando el impacto energético y ambiental a nivel global de la travessía.

Influencia de las características sociológicas

La caracterización de los conductores por género, y para un vehículo tipo turismo de clase LDV3, que resulta el más frecuente, indica que las mujeres tienen tasas de consumo y de emisiones ligeramente mayores que los hombres (figura 10 de la página siguiente). No obstante, esta caracterización carece de significancia, dado que el número de mujeres en la muestra es muy reducido y no resulta representativo.

De la caracterización de los conductores por edades se desprende que, para un mismo tipo de vehículo tipo turismo LDV3,

el grupo de edad con mayores tasas de consumo y emisiones es el de edades comprendidas entre 36 y 60 años. Cabe destacar que, incluso realizando una agrupación de edades con intervalos más acotados, los grupos más jóvenes no adquieren relevancia por tasas de consumo y emisiones frente al resto. Sin embargo, el grupo de conductores con edades mayores que 60 años se caracterizan por un alto consumo y tasa de emisión de CO₂, si bien las emisiones de HC, NO_x y CO son moderadas.

Conclusiones

Los elementos moderadores de tráfico provocan un aumento de los ciclos de aceleración/deceleración en el flujo de tráfico, produciendo un aumento del consumo de carburante y emisiones de los vehículos. La magnitud de este incremento depende, en gran medida, del tipo de conducción, de las características del vehículo y de los propios elementos moderadores.

Respecto de las características sociológicas, las variaciones en las tasas de consumo y emisión por género carecen de significancia estadística. Las mayores tasas de emisión y consumo se obtienen para conductores del grupo de edades comprendidas entre 36 y 60 años.

Respecto de los pasos elevados, el im-

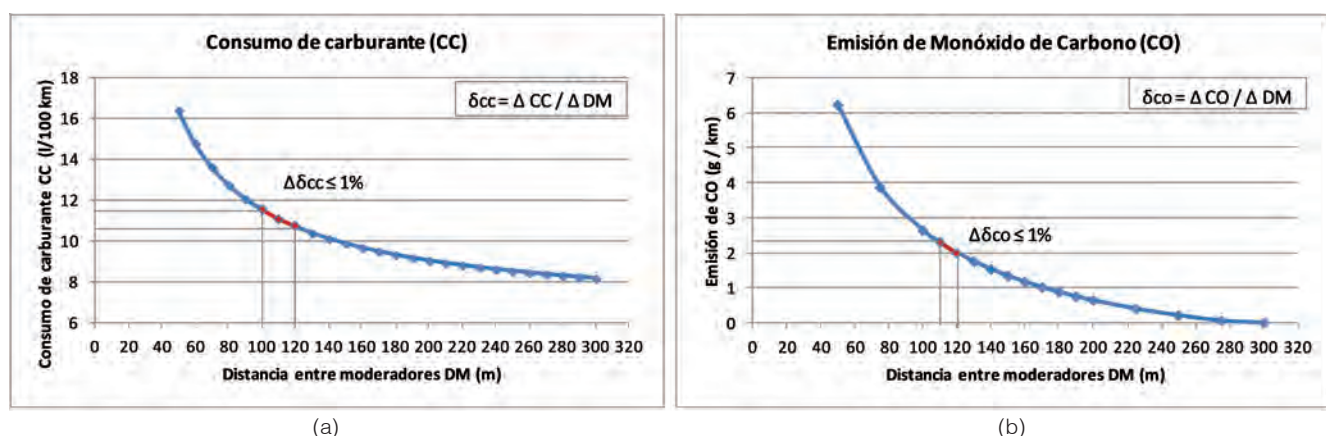


Figura 9. Evolución del consumo de carburante y las emisiones de CO en función de la distancia entre moderadores

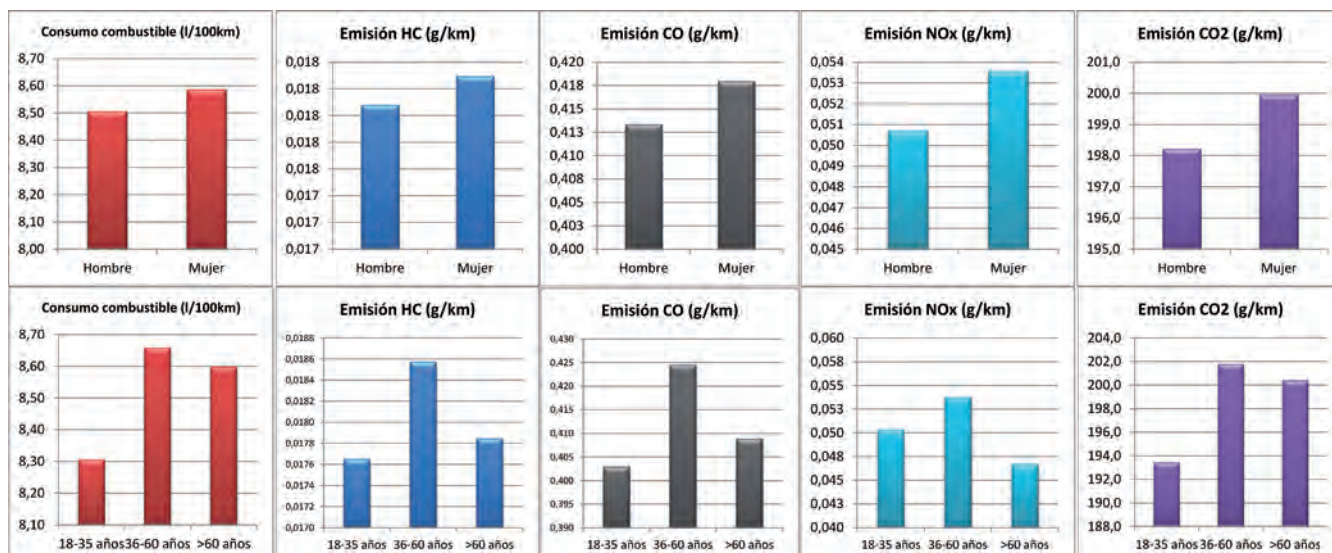


Figura 10. Caracterización de consumos de carburante y emisiones en vehículos tipo LDV3 según género y grupos de edad

pacto energético y ambiental depende en mayor medida de la disposición de los elementos dentro del sistema moderador de tráfico, y no de las características geométricas individuales de los mismos. Por lo tanto, además del adecuado diseño individualizado de los pasos elevados, es necesario un diseño óptimo de funcionamiento en conjunto como un sistema de moderadores de tráfico.

Considerando que en tramos de travesía con doble sentido de circulación el diseño óptimo requiere que los elementos moderadores sean equidistantes, la distancia mínima a mantener entre pasos elevados, según los modelos obtenidos de consumo de carburante y emisión de monóxido de carbono, se sitúa entre los 110 y 120 m. La separación máxima está condicionada principalmente por criterios de funcionalidad y seguridad vial, si bien cabe considerar que equidistancias muy elevadas pueden potenciar el impacto energético y ambiental a nivel global de la travesía.

Por último, la optimización del impacto energético y ambiental de los sistemas de moderación de tráfico en travesías pasa por el diseño de un espaciamiento entre elementos que permita un flujo de tráfico de velocidad uniforme, eliminando las deceleraciones y aceleraciones bruscas e induciendo una conducción menos agresiva. La consideración del sistema de moderación como un conjunto de elementos funcionando de forma integrada, y no individualizada, posibilita un decremento sustancial de consumo de carburante y emisiones.

Los resultados obtenidos permiten incorporar los principios de sostenibilidad a

los ya existentes de seguridad vial en el diseño de sistemas para la moderación del tráfico urbano.

Agradecimientos

La presente investigación no habría sido posible sin contar con los datos de las observaciones efectuadas en travesías en el marco del proyecto de investigación "Metodología para el diseño e implantación de sistemas de moderación de tráfico" (MODETRA), subvencionado por el CEDEX del Ministerio de Fomento de España, con Referencia PT-2007-052-23/APM.

Asimismo, agradecer al Profesor Hesham Rakha, Director del Centro para la Movilidad Sostenible del Instituto Tecnológico del Transporte de Virginia, su colaboración mediante el modelo de estimación de consumo y emisiones VT-Micro.

Referencias

- [1] Dab, W., Ségala, C., Dor, F., Festy, B., Lameloise, P., Le Moulec, Y., Le Tertre, A., Médina, S., Quénel, P., Wallaert, B. y Zmirou, D. (2001). Air pollution and health: correlation or causality? The case of the relationship between exposure to particles and cardiopulmonary mortality. *J Air Waste Manag Assoc.* 2001 Feb; 51(2): 220-35.
- [2] Hoek, Brunekreef, Goldbohn, Fischer y van den Brandt (2002). Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet*, 360 (9341): 1203-9.

- [3] Colville, R. N., Hutchinson, E.J., Mindell, J. S. y Warren, R. F. (2001). The transport sector as a source of air pollution. *Atmos. Env.* 35(9), 1537-1565.
- [4] Boulter, P.G., Hickman, A.J., Latham, S., Layfield, R., Davies, P. y Whiteman, P., (2001). The impacts of traffic calming measures on vehicle exhaust emissions, *TRL report 482*. Transport Research Laboratory, Crowthorne.
- [5] Daham, B., Andrews, G.E., Li, H., Partridge, M., Bell, M.C. y Tate, J. (2005). Quantifying the Effects of Traffic Calming on Emissions Using On-road Measurements. Institute of Transport Studies, University of Leeds. ISSN 0148-7191.
- [6] Ahn K., Rakha H. (2009). A field evaluation case study of the environmental and energy impacts of traffic calming. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2009). Volume: 14, Issue: 6, pp 411-424.
- [7] García, A. y Pérez, A. (2009). Estudio sobre la gestión variable de la velocidad en las vías de acceso a las áreas urbanas. Cambra de Comerç de Barcelona.
- [8] Moreno, A.T., García, A., y Romero, M.A. (2011). Speed table evaluation and speed modeling in cross-town roads. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2203, pp 85-93.
- [9] Rakha H., Ahn K. y Trani A. (2004). The VT-Micro Framework for Modeling of Hot Stabilized Light Duty Vehicle and Truck Emissions. *Transportation Research, Part D: Transport & Environment*, Vol. 9(1), January, pp. 49-74. ❖