

Análisis de la relación entre el índice de congestión y el consumo de combustible basado en datos empíricos

Álvaro García-Castro

Investigador, Centro de Investigación del Transporte TRANSyT. Universidad Politécnica

RESUMEN

Entre los principales problemas causados por el incremento del transporte por carretera en las últimas décadas destacan el aumento del gasto energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CO₂. No en vano, el transporte por carretera aporta aproximadamente el 22% del total de GEI en los países de la OCDE, superando el 25% en el caso de España.

En áreas metropolitanas, el problema se agrava por el efecto de la congestión. Tanto los modelos de transporte como las últimas versiones de navegadores GPS consideran la variabilidad del tráfico en sus estimaciones de tiempos de viaje. Sin embargo, el efecto de la congestión en el consumo de combustible solo es tenido en cuenta en modelos muy detallados, que necesitan una gran cantidad de datos.

En este estudio se pretende establecer una relación empírica entre un índice de congestión y el consumo. Para ello se han tomado datos reales de vehículos flotantes en diversos tramos del área metropolitana de Madrid. En concreto, se registraron un total de 3.800 viajes bajo distintas situaciones de tráfico y estilos de conducción. El análisis de estos datos refleja para todos los vehículos tendencias similares, llegándose, en algunos tramos, a doblar el consumo por el efecto de la congestión.

Desarrollando estas relaciones para distintas tipologías de vías, resultaría posible introducir esta variable en modelos de transporte, navegadores o planificadores de ruta.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero

La emisión de gases de efecto invernadero y el excesivo consumo de recursos energéticos es un problema global, tanto en sus causas como en sus consecuencias (Ramanathan y Feng, 2009), siendo el sector transporte uno de los mayores emisores a pesar de los avances que se han producido en el ámbito de las tecnologías de motores.

Según las estadísticas que ofrece la Agencia Medioambiental Europea (European Environment Agency, 2013) el transporte por carretera ha comenzado a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), pero sigue aportando aproximadamente el 93% de las emisiones atribuibles al sector transporte, lo que supone aproximadamente un 20,4% del total, cifras ligeramente superiores a las que ofrecen otros países desarrollados como Japón (Greenhouse Gas Inventory Office of Japan, 2011). En Estados Unidos, el porcentaje de la contribución del transporte por carretera al total de emisiones de GEI es incluso mayor, llegando casi al 22% (U.S. Environmental Protection Agency, 2013).

En el caso concreto de España, el sector transportes es la fuente de emisiones de GEI que presenta un mayor crecimiento, destacando también el transporte por carretera (Pérez y Monzón, 2006). El transporte por carretera en España contribuye con el 26% de emisiones de CO₂ sobre el total (ITF/OECD, 2010) y se encuentra entre los ratios más altos de Europa de consumo de energía del transporte per cápita transporte.

Es importante reseñar que una gran parte del consumo y las emisiones de GEI del transporte por carretera se concentran en áreas metropolitanas, según la Agencia Medioambiental Europea, alrededor del 40% (European Environment Agency, 2010).

En este contexto, muchos de los esfuerzos encaminados a reducir el consumo energético se centran en el sector del transporte por carretera. La Comisión Europea (European Commission, 2009) propone una política integrada para atajar el problema desde varios puntos, entre los que se pueden citar la gestión de la demanda, el cambio hacia modos más limpios, la mejora en las tecnologías de los vehículos y el uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC).

1.2. La congestión en modelos de transporte, emisiones y sistemas de información

1.2.1 Modelos energéticos y de emisiones

Los modelos energéticos y de emisiones generalmente están desarrollados a partir de un gran número de mediciones de casos reales, siendo necesario distinguir entre distintos tipos y motorizaciones de vehículos. Según el nivel de detalle del modelo, estos vehículos se agregan en categorías con niveles de consumo y emisiones similares.

Las características de operación del vehículo y su perfil de velocidad (Smit et al., 2007) son los elementos determinantes, aunque también se tienen en cuenta características ambientales.

Los modelos de consumo y emisiones se pueden clasificar según su nivel de desagregación, desde los muy detallados que se basan en los perfiles de velocidad de cada vehículo hasta los más agregados.

El primer grupo de modelos (modelos micro) estima los resultados de forma precisa, pero necesitan datos muy detallados y en algunos casos un laborioso proceso de calibración. El principal requerimiento de esta familia de modelos son los perfiles individuales de velocidad de cada vehículo, teniendo en cuenta así la congestión de forma explícita. Entre estos modelos, algunos como CRUISE (Hasewend, 2001) se basan en datos detallados del motor y la estimación de las fuerzas que se oponen al movimiento mientras que otros como VERSIT+ (Smit et al., 2007) estiman los resultados a partir de relaciones empíricas obtenidas del análisis estadístico de perfiles de velocidad, consumo y emisiones reales.

Para el análisis de grandes redes se aplican modelos a nivel macro, los cuales basan sus resultados en datos agregados. En esta familia destacan los modelos de velocidad media, que utilizan la velocidad de circulación media en cada vía, los flujos de tráfico y la composición de la flota para estimar la emisión. Ejemplos de este tipo son MOBILE (Parrish, 2006), MOVES (Liu y Barth, 2011) y COPERT (Ntziachristos y Samaras, 2000).

La velocidad media es un factor clave en el consumo de combustible y por lo tanto las emisiones de CO₂. Sin embargo, desde el punto de vista de la ingeniería de tráfico, la propia velocidad media no explica suficientemente la variabilidad de las condiciones del tráfico y de los diferentes niveles de congestión (Ahn y Rakha, 2008). Como se ha dicho anteriormente, el perfil de velocidad es determinante. Por ejemplo, una velocidad media de 50 km/h en un distribuidor urbano con coordinación semafórica podría reflejar las condiciones de flujo libre, logrando una velocidad prácticamente constante. Esta misma velocidad media en un tramo de autopista puede darse con altos niveles de congestión, lo que según veremos tiene implicaciones claras sobre el consumo de combustible y las emisiones. Esta variabilidad en torno a la velocidad media, hace necesario el estudio de los perfiles de velocidad.

Entre estas dos familias de modelos de consumo y emisiones, se puede encontrar una amplia gama de diferentes enfoques. Algunos de ellos tienen en cuenta específicamente una serie de situaciones (cualitativas) de tráfico para diferentes tipos de vías, que incluyen flujo libre, normal y congestión en autopistas, carreteras convencionales, arterias urbanas y vías locales. Ejemplos de estos modelos en Europa son HBEFA (Hausberger et al., 2009), en el que se utilizan perfiles de velocidad seleccionados para cada situación, y Artemis (Andre et al., 2004), en el que se generan ciclos de conducción basados en viajes reales.

Con el objetivo de tomar en cuenta las diferentes condiciones de tráfico, el modelo TEE (Agostini et al., 2005) genera ciclos de conducción artificiales en función de parámetros de tráfico, tales como la intensidad circulatoria, número de carriles o número de intersecciones por kilómetro, que más tarde se utilizan para corregir la estimación de los modelos de velocidad, en este caso específico COPERT.

Esta revisión de los modelos de consumo de energía de emisión y muestra una amplia gama de enfoques, cuya aplicación depende principalmente de la disponibilidad de datos y las necesidades de resolución espacial y temporal.

1.2.2 Sistemas de información vía web o navegadores

Los calculadores de ruta on-line ofrecen información sobre rutas óptimas basándose en diferentes parámetros. Generalmente sugieren la ruta más corta a partir de complejos algoritmos desarrollados a partir del de Dijkstra (Dijkstra, 1959), pero muchos de ellos tienen en cuenta otra serie de factores, tales como límites de velocidad, peligrosidad e incluso la situación actual del tráfico.

Por ejemplo, este es el caso de Google Maps (Barth, 2009), donde es posible mostrar la ruta óptima y el tiempo estimado según la situación del tráfico y el nivel de congestión. En sus inicios, esta opción se basaba en datos históricos, mientras que hoy en día se basa en datos extraídos de la posición instantánea de los usuarios de teléfonos móviles.

Por otra parte, estas aplicaciones también suelen ofrecer una estimación del consumo de combustible necesario para esa ruta, pudiendo el usuario seleccionar entre categorías generales de vehículos (a menudo 3 categorías). No obstante, este consumo no varía en función de las condiciones de tráfico.

Muy similar es el funcionamiento de los navegadores GPS, ya sean dispositivos portátiles o instalados directamente en los vehículos. De esta manera, el navegador es capaz de recalcular y guiar al usuario por una ruta más rápida. Sin embargo, la ruta más rápida no siempre es la de menor consumo (Ahn y Rakha, 2007). Por este motivo, en los últimos años se han desarrollado algoritmos de “eco-routing” que informan al usuario de la ruta más económica y con menores emisiones (Minett et al, 2011), aunque muy pocas metodologías integran emisiones e información del tráfico en tiempo real (Barth et al., 2007).

1.2.3 Modelos de demanda en el transporte

Los modelos de demanda en el transporte utilizan una función de coste generalizado a la hora de distribuir los viajes entre los diferentes modos y rutas alternativos. Estas funciones de coste incluyen tanto el coste monetario como el no monetario, básicamente el tiempo. En estos modelos, el tiempo de viaje se calcula a partir de la intensidad circulatoria, la

capacidad de la vía y una serie de relaciones empíricas entre estas variables y el tiempo de viaje, conocidas como Volume-Delay Functions (VDF). Estas curvas establecen la demora en un tramo en función del grado de saturación.

Como norma general, el consumo de combustible es considerado en las fórmulas de coste generalizado como una función de la distancia recorrida y solo en algunos estudios se incluye también la velocidad media (Benedek y Rilett, 1998). Con estos algoritmos, la variabilidad del tráfico se tiene en cuenta, pero como ya se ha dicho, los modelos de emisiones basados en la velocidad media pueden resultar en estimaciones erróneas dependiendo de la tipología de la vía.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

La revisión de la literatura nos muestra que los efectos de la congestión en el consumo de combustible son tratados de manera muy diferente según los objetivos del modelo. Solo en los modelos muy detallados a nivel micro, la influencia de la congestión es tratada de forma explícita.

A la vista de este hecho, el objetivo principal de este estudio es analizar a partir de datos empíricos cómo afecta la congestión al consumo de combustible para varias categorías de vehículos. Este análisis se ha realizado en diferentes vías situadas en la zona metropolitana de Madrid.

Como se detalla a continuación, la metodología se basa en el análisis de los datos de consumos y perfiles de velocidad recogidos por medio de vehículos flotantes en varios recorridos realizados en la ciudad de Madrid.

2.1 Campaña de recogida de datos

La campaña de recogida de datos se encuadra dentro del proyecto europeo de investigación “ICT-Emissions” (7º Programa Marco), cuyo objetivo es desarrollar una metodología para poder modelizar en detalle los efectos en las emisiones de GEI de una serie de TIC aplicadas al transporte. La metodología propuesta en el proyecto “ICT-Emissions” se basa principalmente en la interacción de los diversos modelos de simulación (vehículo, tráfico y emisiones) en sus niveles micro y macro.

Cómo valor añadido de este proyecto, se pretende también validar la metodología con varios casos de estudios en las ciudades de Roma, Turín y Madrid. En cada uno de estos casos, se realizan campañas de recogida de datos (espiras, cámaras, vehículos flotantes...) comparando la evolución del tráfico y otros parámetros del vehículo antes y después de la implantación de la medida TIC. Estos resultados son utilizados para calibrar los modelos y posteriormente validar los resultados obtenidos al aplicar la metodología de simulación a estos mismos casos de estudio. En marzo y abril de 2013, y en coordinación con el

Departamento de Tecnologías de Tráfico de Madrid, se llevó a cabo la campaña de recogida de datos. El principal objetivo fue recopilar perfiles de velocidad y consumo de combustible en varios tramos de la autopista de circunvalación M30 (trayectos 1, 2, 3 y 4) y algunas vías urbanas adyacentes (trayectos 5, 6 y 7) (Figura 1).



Fig. 1 – Recorridos monitorizados en la toma de datos de Madrid

Esta campaña de recogida de datos consistió en la realización de un número representativo de viajes a través de las secciones seleccionadas con la técnica del vehículo flotante. Con este procedimiento, es posible obtener los perfiles de velocidad instantánea y consumo. Se contó con tres turismos FIAT para este estudio, un Punto 1.2 l. gasolina y dos Diesel, Punto y Bravo, con motores de 1,3 l. y 1,6 l. respectivamente. El número total de conductores fue de 9 y el total de viajes registrados fue de casi 3.800.

El posterior tratamiento de estos datos, permitió obtener los resultados de consumo de combustible en función de la congestión, que se presentan en la siguiente sección.

2.2 Indicadores de congestión

Una gran variedad de indicadores son empleados para medir la congestión, ya sea en la literatura científica o en informes de autoridades de tráfico que reportan la situación del tráfico en áreas metropolitanas,

Debido a la disponibilidad de datos por parte de las autoridades de tráfico, el indicador más comúnmente empleado es el ratio volumen/capacidad, si bien este indicador presenta una serie de problemas a la hora de analizar la congestión detalladamente (Boarnet et al., 1998). El principal problema es que los usuarios no están realmente interesados en este

tipo de información, sino en la referente al tiempo empleado en realizar su recorrido. Este hecho, sumado a las diferentes tecnologías actuales que permiten la medición de tiempos de viaje, hace que la tendencia sea ofrecer indicadores de congestión basados en el tiempo perdido en la congestión (demora) con relación al tiempo empleado en condiciones de flujo libre.

Tras el análisis bibliográfico (Smit, 2006), (Taylor, 2000), (Cohn et al., 2012), (Schrank et al., 2010) y de las tendencias en desarrolladores de software y aplicaciones, se pueden destacar los siguientes indicadores:

- Demora (Delay): Tiempo perdido en un tramo en relación al tiempo que se emplearía en flujo libre
- Ratio de demora (Delay rate): Tiempo perdido por kilómetro de longitud en un tramo en relación al tiempo que se emplearía en flujo libre.
- Índice de Congestión (Congestion Index, CI): Ratio entre el tiempo empleado y el tiempo que se emplearía en flujo libre.
- Índice de reducción de velocidad (speed reduction congestion index, SRCI): Índice normalizado a una escala de 0 a 10. Es el ratio de reducción de la velocidad media en el tramo en relación con la velocidad en flujo libre.
- Índice de congestión Tom Tom: Ratio entre la demora y el tiempo que se emplearía en flujo libre en un tramo determinado.
- Nivel de Servicio (Level of Service, LOS): Es una medida cualitativa de la calidad de la circulación. Sobre una escala de A a F, describe una gama de condiciones de circulación donde A representa condiciones de flujo libre y F congestión severa. En España, la Dirección General de Tráfico utiliza una escala cromática similar, representando el blanco circulación en flujo libre mientras que el negro una congestión severa.

En este estudio se va a analizar la congestión utilizando el ratio de demora. Por un lado, desde el punto de vista del usuario la demora es el indicador más comprensible y en el que está más interesado. Este indicador como ratio en función de la distancia, nos permite comparar tramos de similar naturaleza aunque de diferente longitud.

2.3 Tratamiento de datos

A efectos de este estudio, los trayectos en los que estas medidas estaban activas no se consideran, ya que distorsionarían el consumo.

Una vez eliminados los trayectos con fallos en los dispositivos de recepción GPS, se agruparon los restantes por vehículo y trayecto, obteniendo un total de 2.412, distribuidos según especifica la tabla 1 y siguiendo la numeración establecida en la Figura 1.

N° Trayecto y Vehículo	Autopista Circunvalación M30				Urbano			Total vehículo
	1	2	3	4	5	6	7	
Longitud (km.)	5,8	5,3	5,4	6,7	1,2	1,3	1,6	-
Fiat Bravo 1.6D	72	124	46	44	124	86	82	578
Fiat Punto 1.3D	104	215	72	74	214	146	133	958
Fiat Punto 1.2G	103	172	70	63	191	140	137	876
Total trayecto	279	511	188	181	529	372	352	2412

Tabla 1 – Número de viajes analizados según recorrido y vehículo

El Ratio de Demora (Delay Rate) se calculó de la siguiente manera para cada viaje registrado:

$$DR = \frac{(t - t_0)/60}{l} \quad (1)$$

Siendo:

t = tiempo de recorrido registrado (s)

t_0 = tiempo de recorrido en flujo libre (s)

l = longitud del tramo (km)

El tiempo de recorrido en flujo libre se estableció como el recorrido más rápido en cada trayecto, ya que en todos los tramos se efectuaron mediciones en horas valle con bajas intensidades circulatorias.

En los trayectos registrados en autopista y para aislar otros efectos que influyen en el consumo, tales como la temperatura, estilo de conducción, etc., se han agrupado las mediciones de acuerdo a los niveles de servicio (LOS) definidos según la AAHSTO (2001). Para una mayor precisión, ya que la mayoría de los viajes registrados se producen en situaciones cercanas al flujo libre, los niveles de servicio A y B han sido divididos en tres subniveles, C y D en dos, mientras que E y F se mantienen en un único nivel de servicio.

3. RESULTADOS EMPÍRICOS. RELACIÓN CONSUMO-CONGESTIÓN

Siguiendo la metodología planteada en el apartado anterior, para cada par vehículo-trayecto se ha obtenido la curva que relaciona el ratio de demora con el consumo de combustible. En el siguiente apartado se analizan algunas de estas curvas.

3.1 Trayectos autopista urbana

Como se puede observar en la Figura 2, dentro del mismo tramo, el consumo presenta una tendencia creciente según aumenta la congestión. Sin embargo, la pendiente es variable según el vehículo, siendo en este caso mayor para el vehículo de mayor cilindrada.

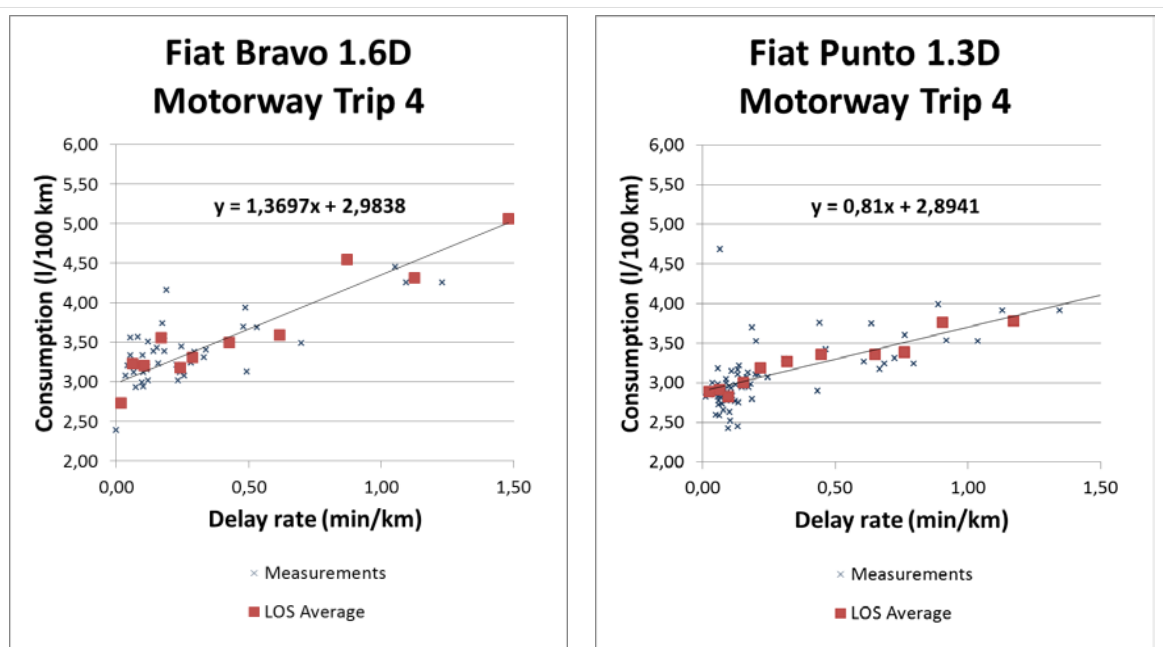


Fig. 2 – Ejemplos de consumo en función de la demora en el tramo (4) de autopista urbana

El hecho de que la pendiente sea mayor en el vehículo de mayor cilindrada se repite sistemáticamente para el resto de tramos en los que la congestión es reseñable, como se puede ver en la Tabla 2.

Nº Trayecto y Vehículo	Autopista Circunvalación			
	1	2	3	4
Fiat Bravo 1.6D	0,9405	0,8388	1,2212	1,3697
Fiat Punto 1.3D	0,1888	0,5549	-0,8125	0,8100
Fiat Punto 1.2G	0,9035	0,7771	-3,0272	0,6454

Tabla 2 – Pendiente de la recta de regresión para cada trayecto y vehículo

Como puede observarse, el tramo 3 presenta pendientes negativas. Esto se debe a que en este tramo no se alcanzan altos niveles de congestión, por lo que el aumento de la demora no implica fenómenos de frenadas y aceleraciones sino que simplemente se reduce ligeramente la velocidad media en comparación con la de flujo libre. Analizando solo los niveles de servicio cercanos al flujo libre se obtienen en la mayoría de los casos pendientes negativas, como queda reflejado en la Tabla 3.

Nº Trayecto y Vehículo	Autopista Circunvalación			
	1	2	3	4
Fiat Bravo 1.6D	1,4155	-1,3797	1,2212	1,3697
Fiat Punto 1.3D	-3,8528	-2,0475	-0,8125	-0,7977
Fiat Punto 1.2G	-3,8255	-0,1339	-3,0272	-4,1423

Tabla 3 – Pendiente de la recta de regresión en niveles y subniveles de servicio A y B, para cada trayecto y vehículo

Estas pendientes negativas para bajos ratios de demora, nos llevan a considerar que existe un mínimo de consumo en función del ratio de demora, el cual dependerá del trayecto y del vehículo. De esta manera, la función se ajusta a una curva como puede verse en la figura 3.

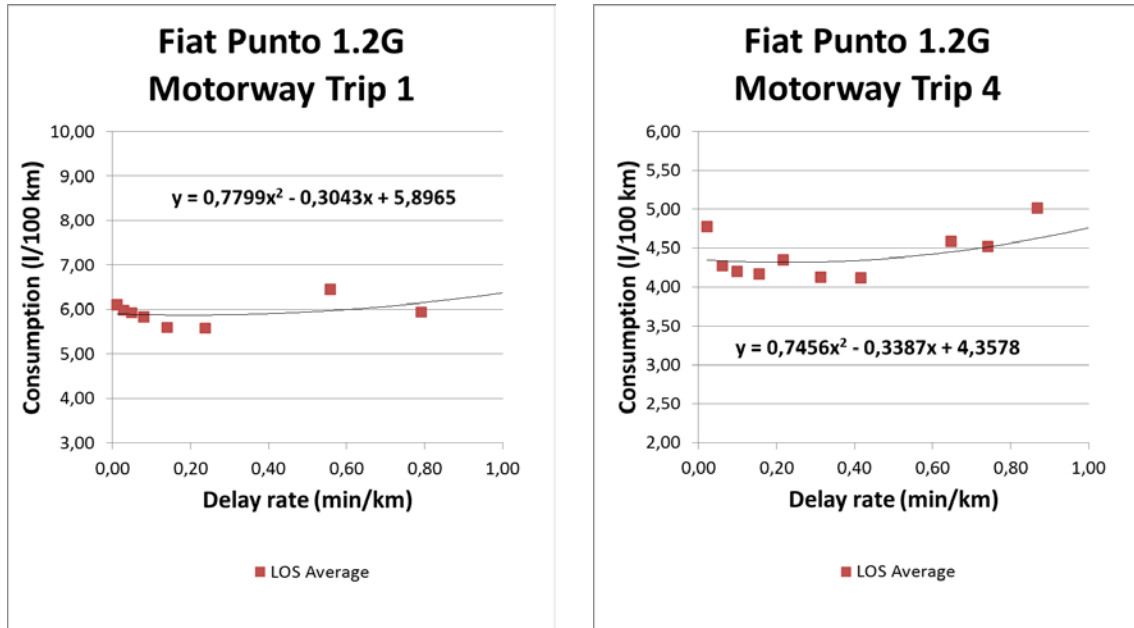


Fig. 3 – Curva de ajuste de consumo en función de la demora en varios tramos de la autopista M30. Fiat Punto 1.2G

3.1.1 Análisis del consumo en función de la homogeneidad del perfil de velocidad

Para estudiar porque se produce este óptimo, es necesario analizar un indicador que refleje la homogeneidad de la velocidad a lo largo de un tramo. De esta manera, Garcia-Castro y Monzon (2013) definen la aceleración positiva acumulada (PAA, Positive Accumulated Acceleration) como un indicador obtenido a partir del análisis del perfil de velocidad en un tramo y que gráficamente representa el área encerrada bajo la curva de aceleraciones positivas. Por tanto, un trayecto en el que la velocidad es muy variable, tenderá a tener comparativamente un valor del indicador PAA mucho mayor que el mismo trayecto realizado a una velocidad prácticamente uniforme.

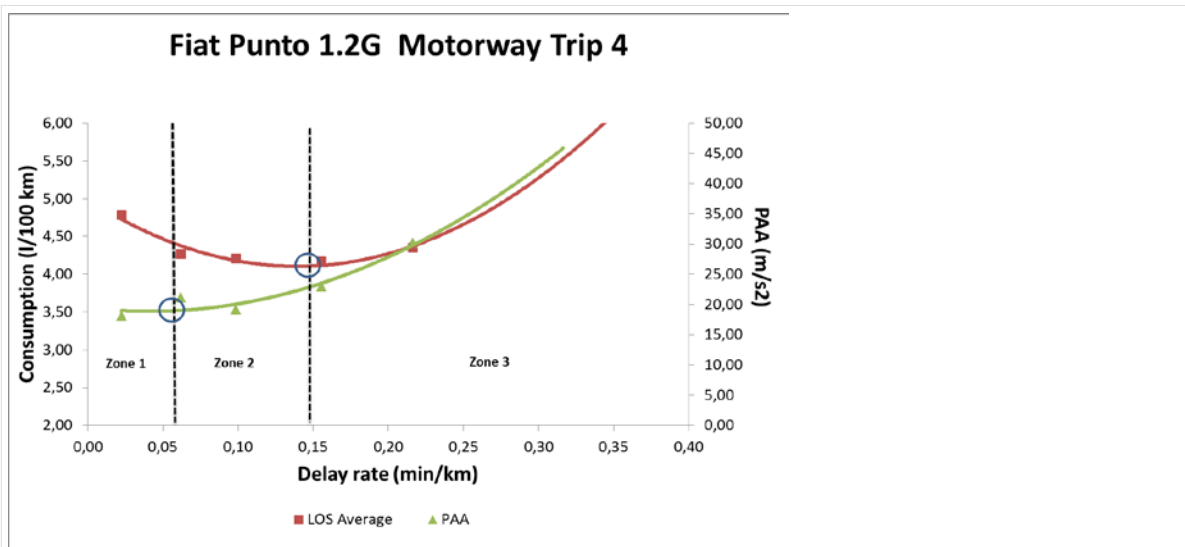


Fig. 4 – Curvas de consumo y aceleración acumulada en función de la demora, para un tramo de autopista urbana M30. Fiat Punto 1.2G

Analizando dónde se sitúan los mínimos de las curvas de consumo y PAA, se pueden establecer tres zonas diferenciadas en lo relativo al consumo en función de la congestión. (Figura 4).

Para ratios de demora próximos a cero, el consumo disminuye debido a que la velocidad media también decrece pero manteniéndose homogénea, es decir, el indicador PAA permanece prácticamente constante.

Una vez que el indicador PAA comienza a crecer debido a que la intensidad circulatoria hace el flujo más inestable y se provocan fenómenos de frenado. Cuando se alcanza el mínimo, la disminución de velocidad media no es suficiente para contrarrestar el efecto en el consumo de los procesos de aceleración-frenado.

Por último, en la tercera fase, el consumo se dispara debido a que al efecto negativo del aumento del indicador PAA, se suma que a esas velocidades el vehículo deja de situarse en la zona de máxima eficiencia.

3.2 Trayectos urbanos

En trayectos urbanos se observa (Figura 5) una tendencia más lineal que en los viajes en la autopista urbana M30.

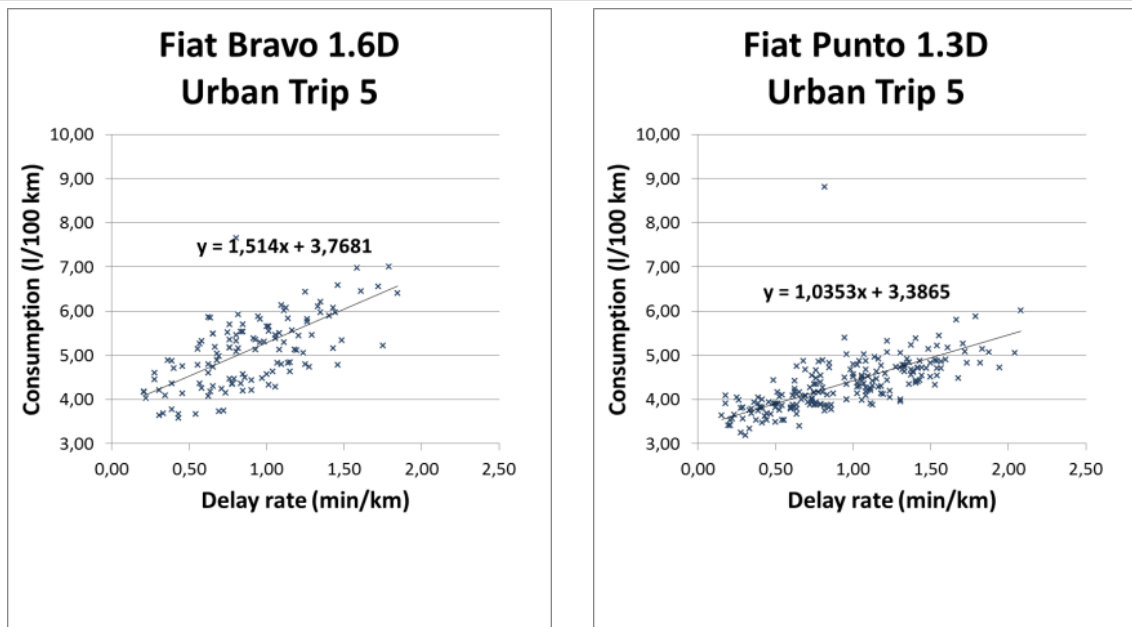


Fig. 5 – Consumo en función de la demora en el tramo urbano (5)

Esto concuerda con el hecho de que para el rango de velocidades urbanas, un decremento de la velocidad media en un tramo siempre implica un aumento de combustible según las curvas de rendimiento de los motores (Barth y Boriboomsomsin, 2010). En zonas urbanas, tanto el consumo como la aceleración positiva acumulada (PAA) se comportan de manera lineal, no observándose distintas zonas como en el caso de autopista (Figura 6).

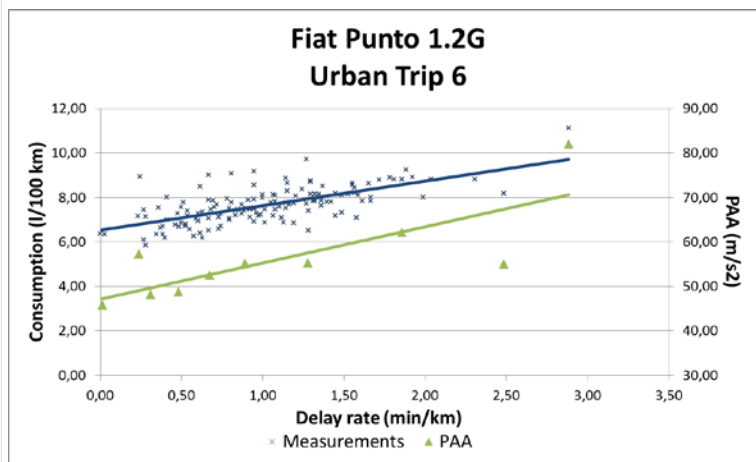


Fig. 6 – Rectas de consumo y aceleración acumulada en función de la demora, para un tramo urbano. Fiat Punto 1.2G

Del mismo modo que en el análisis realizado para los tramos de autopista, la demora influye más en el vehículo de mayor cilindrada, como muestran (Tabla 4) las pendientes de las rectas de ajuste calculadas para cada tramo y vehículo.

Nº Trayecto y Vehículo	Tramos urbanos		
	5	6	7
Fiat Bravo 1.6D	1,514	1,0353	1,3394
Fiat Punto 1.3D	1,3506	0,6922	1,0964
Fiat Punto 1.2G	1,4401	0,9041	1,1746

Tabla 4 – Pendiente de la recta de regresión para cada trayecto y vehículo en zona urbana

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una clara relación entre la congestión y el consumo de combustible. En el caso de una autopista urbana como es la M30 en Madrid, los datos recogidos muestran que ligeros aumentos de tráfico partiendo de condiciones de flujo libre resultan positivos en términos de ahorro de combustible.

Se observa de este modo, que para cada tramo de autopista se obtiene un óptimo de consumo en función del ratio de demora. Una vez rebasado este óptimo, el aumento de la intensidad circulatoria provoca que los perfiles de velocidad sean menos homogéneos, haciendo que el consumo aumente de forma más lineal.

Por el contrario, el análisis de los datos en zonas urbanas presenta un comportamiento distinto. Para los rangos de velocidades estudiados en estas zonas, el consumo aumenta linealmente en función de la congestión.

El análisis de la homogeneidad del perfil de velocidad realizado hace ver que el consumo de combustible depende en gran medida del momento en el que la intensidad circulatoria provoca inestabilidades en el flujo. Es por ello que el óptimo se alcanza en un punto distinto dependiendo del tipo de vía.

Por tanto, queda patente la necesidad de incluir parámetros de congestión en los modelos de consumo de combustible, ya que las variaciones en función del nivel de tráfico pueden ser superiores al 100%. Por otra parte, el uso de un solo indicador (habitualmente velocidad media) para cualquier tipo de vía entraña algún riesgo, ya que, como se ha visto, el óptimo de consumo también depende de la aceleración acumulada en el tramo, es decir, de la homogeneidad de la velocidad.

Para una mayor precisión en el cálculo de consumo de combustibles y emisiones sin acudir a modelos microscópicos que requieren gran cantidad de datos, sería por tanto aconsejable ajustar los modelos de velocidades medias añadiendo un factor de congestión en función de la tipología de vía.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Comisión Europea, bajo el proyecto *ICT-Emissions*, "Desarrollo de una metodología y herramientas para evaluar el impacto de las medidas TIC en las emisiones del transporte por carretera", Grant Agreement N° 288568. Igualmente, se agradece la colaboración del Ayuntamiento de Madrid y Calle-30 en el proceso de toma de datos.

REFERENCIAS

AASHTO. Policy on geometric design of highways and streets. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2001.

AGOSTINI, A., LELLI, M., NEGRENTI, E., y PARENTI, A. (2005). TEE2003: Transport energy & environment: An advanced software tool for the estimation of direct impacts from transport. En: *Urban Transport XI: Urban Transport and the Environment in the 21st Century*. Wit Press.

AHN, K., y RAKHA, H. A. (2007). Energy and environmental impacts of route choice decisions. *Transportation Research Board 86th Annual Meeting, January 2007*, (07-1190), Washington D.C.

AHN, K., y RAKHA, H. A. (2008). The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(3), 151-167.

ANDRÉ, M., KELLER, M., SJÖDIN, Å., GADRAT, M., y MC CRAE, I. (2008). The ARTEMIS European tools for estimating the pollutant emissions from road transport and their application in Sweden and France. *17th International Conference Transport and Air Pollution*, pp. 118-127.

BARTH, D. (2009). The bright side of sitting in traffic: Crowdsourcing road congestion data. Consultado en 01/2014, de from <http://googleblog.blogspot.com.es/2009/08/bright-side-of-sitting-in-traffic.html>

BARTH, M., BORIBOONSOMSIN, K., y VU, A. (2007). Environmentally-friendly navigation. *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE*, pp. 684-689.

BARTH, M., & BORIBOONSOMSIN, K. (2010). Traffic congestion and greenhouse gases. *TR News*, (268)

BENEDEK, C., y RILETT, L. (1998). Equitable traffic assignment with environmental cost functions. *Journal of Transportation Engineering*, 124(1).

BOARNET, M. G., KIM, E. J., y PARKANY, E. (1998). Measuring traffic congestion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1634(1), 93-99.

COHN, N., KOOLS, E., y MIETH, P. (2012). The TomTom congestion index. *19th ITS World Congress, Vienna, Austria, 22 to 26 October 2012*.

DIJKSTRA, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1: 269–271.

EUROPEAN COMMISSION. Mobilising Information and Communication Technologies to Facilitate the Transition to an Energy Efficient, Low-carbon Economy. COM (2009) 111, 2009.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. State and Outlook 2010. Urban Environment. Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-9213-151-7. 2010.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2011 and inventory report 2013. European Environment Agency. 2013.

HAUSBERGER, S., REXEIS, M., ZALLINGER, M., y LUZ, R. Emission factors from the model PHEM for the HBEFA. Version 3 No. I-20/2009. Graz, Austria. TU Graz, 2009.

HASEWEND, W. (2001). AVL Cruise - Driving performance and fuel consumption simulation. *ATZ worldwide* 103(5), pp. 10-13.

ITF/OECD. Transport greenhouse gas emissions: Country data 2010. International Transport Forum, 2010.

GARCIA-CASTRO, A. y MONZON, A. (2013). Variable Speed Limits. Review and Development of an Aggregate Indicator Based on Floating Car Data. *Proceedings of the 13th International Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication" (RelStat'13), 16–19 October 2013, Riga, Latvia*, p. 117–127. ISBN 978-9984-818-58-0.

GREENHOUSE GAS INVENTORY OFFICE OF JAPAN. National Greenhouse Gas Inventory Report of Japan, Ministry of the Environment, Japan, 2011.

LIU, H., y BARTH, M. (2011). Analysis of US EPA's MOVES Model's operating modes and handling of history effects. *90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2011, Washington, DC.*

MINETT, C. F., SALOMONS, A. M., DAAMEN, W., VAN AREM, B., y KUIJPERS, S. (2011). Eco-routing: Comparing the fuel consumption of different routes between an origin and destination using field test speed profiles and synthetic speed profiles. *Integrated and Sustainable Transportation System (FISTS)*, 2011 IEEE Forum on, pp. 32-39.

NTZIACHRISTOS, L. y SAMARAS, Z., (2000). Speed-dependent representative emission factors for catalyst passenger cars and influencing parameters. *Atmospheric Environment*, 4611-4619.

PARRISH, D. D. (2006). Critical evaluation of US on-road vehicle emission inventories. *Atmospheric Environment*, 40(13), 2288-2300.

PÉREZ, P. J., y MONZÓN, A. Informe sobre transporte y medio ambiente. Trama 2006. Centro de Publicaciones Secretaría General Técnica Ministerio de Medio Ambiente, 2006.

RAMANATHAN, V. y FENG, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment* 43(1), pp. 37-50.

SCHRANK, D., LOMAX, T., y TURNER, S. TTI's 2010 Urban Mobility Report Powered by INRIX Traffic Data. Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System, 2010.

SMIT, R. (2006). *An examination of congestion in road traffic emission models and their application to urban road networks*. Tesis Doctoral, Griffith University, Australia.

SMIT, R., SMOKERS, R. y RABE, E. (2007). A new modelling approach for road traffic emissions: VERSIT+. *Transportation Research Part D-Transport and Environment* 12(6), pp. 414-422.

TAYLOR, M.A.P. (2000) Network modelling of the traffic, environmental and energy effects of lower urban speed limits. *Road and Transport Research* 9(4), pp.48-57.

U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 - 2011, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC., 2013.