

Eco-driving: eficiencia energética y conducción responsable

Andrés Monzón* y Alessandra Boggio-Marzet**

Resumen

El crecimiento urbano y el *boom* del *e-commerce* hacen que la dependencia del transporte por carretera crezca, así como su ineficiencia y los impactos sobre la ciudad. Por ello, resulta indispensable involucrar al ciudadano en las políticas de reducción de consumos en el transporte urbano. Esta investigación presenta los resultados obtenidos de dos trabajos de campo en el Área Metropolitana de Madrid, y analiza el efecto de la conducción eficiente (*eco-driving*), tanto en coches particulares, como en vehículos comerciales. Los conductores realizaron un curso de conducción eco. Para evaluar su eficiencia y medir los ahorros energéticos, se tomaron datos reales de los parámetros de tipo de conducción y consumo de combustible en recorridos urbanos, antes y después del curso, a lo largo de 6.763 km y 7.262 km respectivamente. Los tramos seleccionados corresponden a diferentes tipos de vía y condiciones de tráfico. El ahorro de combustible llegó hasta un 6,5% en coches particulares, correspondiendo el mayor ahorro a las vías periurbanas (8%). Así mismo, la práctica de *eco-driving* en la distribución logística reduce las paradas innecesarias en un 5-6%, las aceleraciones y desaceleraciones hasta un 15%, correspondiendo los mayores ahorros energéticos también a vías de tipo suburbano, llegando hasta el 26%. Por tanto, se recomienda formar a los conductores en conducción eficiente, y promover la conciencia ciudadana sobre los beneficios ambientales de este tipo de conducción.

Palabras clave: Transporte, cambio climático, *eco-driving*, eficiencia energética, movilidad urbana, conducción sostenible.

1. EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL TRANSPORTE: UN OBJETIVO INCUMPLIDO

En 1950 solamente un tercio de la población mundial habitaba en ciudades. Pero esta proporción ha ido cambiando aceleradamente; históricamente en 2007 se igualaron las proporciones de población urbana y rural y se espera que, en 2050, la población rural sea solo un tercio del total. Se habrá producido en el

* Catedrático de Ingeniería del Transporte – UPM.

** Investigadora de TRANSyT – Centro de Investigación del Transporte-UPM.

transcurso de un siglo un cambio de paradigma: el entorno de vida minoritario ha pasado a ser el dominante (United Nations, 2020). Este desequilibrio es más acusado aún en el caso de la Unión Europea (UE), con un 75% de población urbana (Banco Mundial, 2017). Por otra parte, las ciudades son motor de la actividad económica: en el caso de la UE el 85% del PIB comunitario se localiza en los núcleos urbanos. Pero dicha concentración compromete la calidad de la vida urbana, que a su vez es clave para la vitalidad económica y social. Aunque las ciudades ocupan solamente el 2% de la superficie terrestre del planeta, consumen más del 65% de la energía mundial y son responsables de más del 70% de las emisiones mundiales de CO₂ producidas por el hombre. Por lo tanto, las ciudades deben desempeñar un papel crucial para ayudar a alcanzar los objetivos de transformación sistémica, hacia la neutralidad climática, aprovechando soluciones de innovación y optimización (tecnológica y no tecnológica).

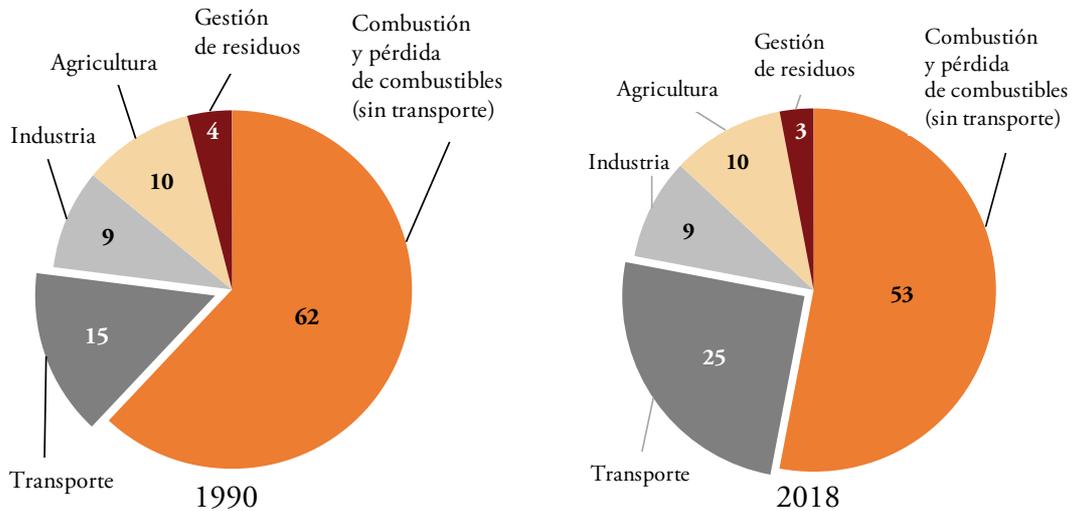
Este cambio de paradigma no podría haberse producido sin el desarrollo de sistemas de transporte, y en particular de las redes multimodales de los núcleos de población. Pero el transporte, al tiempo que facilita el desarrollo y la actividad urbana, es también causante de importantes externalidades, que comprometen la calidad de vida, y a la larga pueden suponer pérdida de actividad y población.

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, el sector del transporte es responsable de un cuarto de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI) en la Unión Europea (UE) y contribuye significativamente al cambio climático (EEA, 2019). Mientras que otros sectores económicos, como la generación de energía y la industria, han reducido drásticamente sus emisiones respecto al nivel de 1990 (Protocolo de Kioto), las emisiones del transporte han aumentado, estando en 2018 un 29% por encima de los niveles de 1990. Y dentro del sector, el transporte por carretera es la principal responsable, al tener mayores crecimientos que el resto de modos, tanto para pasajeros como mercancías (gráfico 1).

Por tanto, se puede decir que los esfuerzos internacionales, y en particular la política europea, recogida en los sucesivos Libros Blancos¹, no han conseguido

¹ Libro Blanco del Transporte de 2001: “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad”. 2006 Mid-Term Review: introduce el término “co-modalidad”. Libro Blanco de 2011: “Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible”.

Gráfico 1

Emisiones GEI por sector UE-27, 1990 y 2018

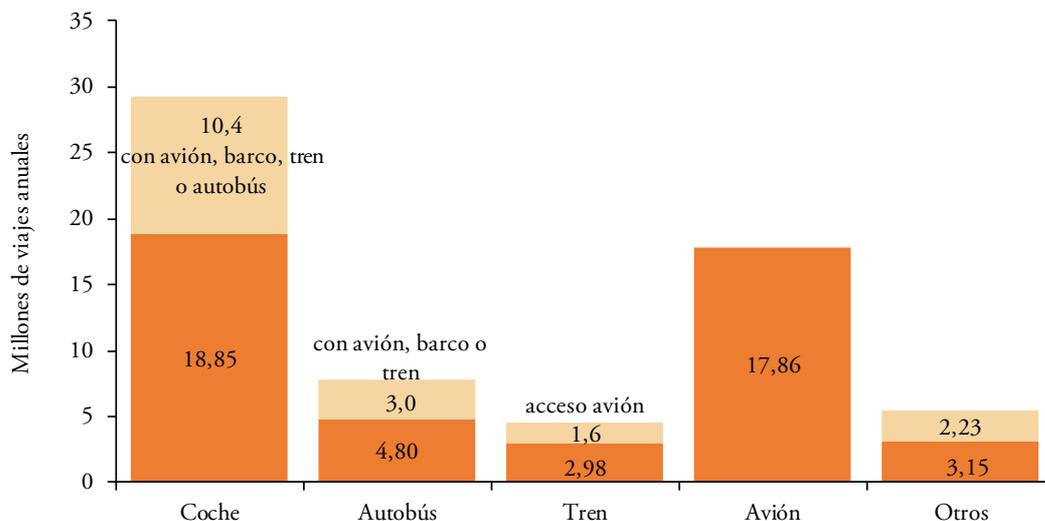
Fuente: Eurostat (2020).

ni el objetivo de equilibrar los modos, ni reducir las emisiones globales del transporte, a pesar de contar con tecnologías de propulsión más eficientes. El modo dominante sigue siendo la carretera, y el efecto de todas las mejoras –vehículos y combustibles– han sido compensadas por el crecimiento de la demanda y de los recorridos: más viajes y a más distancia han compensado ampliamente las limitadas mejoras. Solamente la crisis económica (2008-2013) y el COVID-19 en la actualidad, han producido una reducción de emisiones, pero por la disminución de la actividad económica, y no porque el transporte haya sido más eficiente. El gráfico 2 muestra como el coche y el autobús son los modos dominantes en el transporte de viajeros de larga distancia, siendo además los principales modos de acceso a otros modos.

En este contexto, la Unión Europea ha lanzado en 2019 el denominado *Green Deal*, que propone un pacto por el clima, aunando una estrategia de crecimiento con el objetivo de preservar el planeta para las generaciones futuras. Uno de los elementos de acción clave es “acelerar el cambio hacia una movilidad inteligente y sostenible”, cuyo objetivo es reducir en un 90% las emisiones actuales del transporte en el horizonte de 2050.

Gráfico 2

Modos de los viajes de más 500 km en España

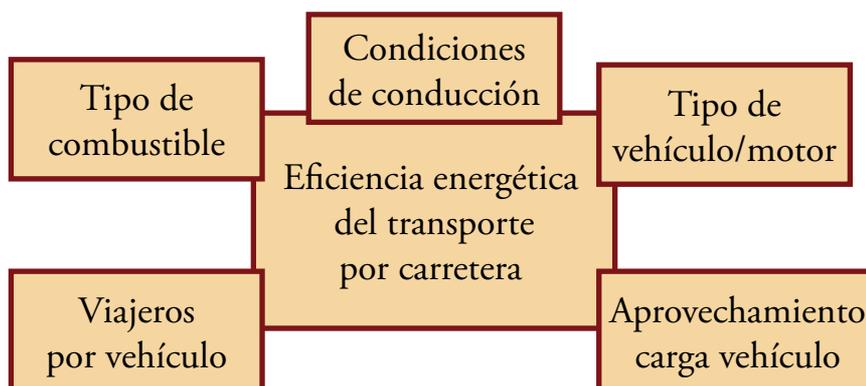


Fuente: Elaboración de los autores, a partir de datos de Movilia 2007 (Ministerio de Fomento).

En cualquier caso, el objetivo de la eficiencia energética del transporte por carretera, puede enfocarse desde diversos ámbitos de actuación, como muestra el gráfico 3: mejora de vehículos y combustibles, aumento de la ocupación, tanto en pasajeros como mercancías, y hacer que la conducción sea más eficiente.

Gráfico 3

Ámbitos de actuación para mejorar la eficiencia energética de la carretera



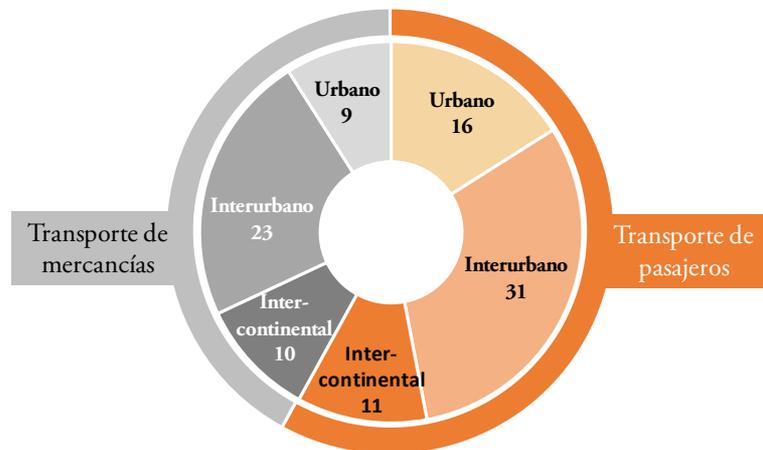
Fuente: Elaboración propia.

Por todo ello, se puede concluir que, para lograr los objetivos de reducción de emisiones y ahorro energético, además de las soluciones tecnológicas y las políticas globales, hay que movilizar a los usuarios del sistema de transporte por carretera.

Por otra parte, una buena proporción de las emisiones del transporte por carretera se concentra en los ámbitos urbanos, como se muestra en el gráfico 4: un 25% del total de emisiones son directamente urbanas, y buena parte de los movimientos interurbanos tienen como origen o destino las ciudades: movimiento de personas y su abastecimiento.

Gráfico 4

Distribución de emisiones de GEI en la Unión Europea



Fuente: EEA (2019).

Es una de las razones, por las que el antes citado *European Green Deal* (2019) propone una serie de acciones para reducir drásticamente las emisiones urbanas, reducir la congestión y mejorar el uso del transporte público.

2. LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRANSPORTE URBANO

El transporte urbano, incluyendo tanto la movilidad de pasajeros como el transporte de mercancías, es parte indispensable de la vida de las personas, apoyando

las actividades industriales y comerciales. Hoy en día ninguna zona urbana podría existir sin un sistema fiable de transporte. Un apropiado sistema de movilidad urbana debería permitir que todos ejerzan su derecho a desplazarse sin que ello suponga externalidades ambientales, sociales y económicas. El consumo energético afecta claramente a todas ellas, pues produce emisiones contaminantes y gases de efecto invernadero, tiene un coste económico, y afecta a la calidad de vida.

Pero hay algunos elementos externos al transporte que condicionan una estrategia energética eficiente. Primero, el citado crecimiento urbano y el fenómeno de la suburbanización. Las ciudades crecen en sus periferias metropolitanas, lo que produce formas de urbanización más dependientes del automóvil –menor uso del transporte público– y viajes más largos –dificulta los viajes a pie y en bicicleta. Según Alonso, Monzón y Cascajo (2018), el proceso de dispersión ha reducido en un 14% la eficiencia del transporte público de las principales ciudades españolas en una década.

El segundo aspecto importante a considerar, especialmente para la evolución de la movilidad en vehículos comerciales ligeros, es el *boom* del *e-commerce*. Ha ampliado las oportunidades de elegir entre una gran selección de productos, y está previsto que se duplique en cinco años. Este fenómeno se potencia con el aumento de la población en ciudades, donde la distribución es rápida, al darse frecuencias de reparto altas (Cárdenas *et al.*, 2017). Pero esta distribución es ineficiente, especialmente en ciudades: reparto de paquetes pequeños, más puntos de entrega (cualquier punto de la ciudad se convierte en un punto de entrega), tiempos reducidos de reparto, muy bajos factores de carga de los vehículos en una lógica *just-in-time* (Macharis y Lebeau, 2014; Macharis y Nocera, 2019). Estas características hacen que la dependencia de la carretera sea mayor y que la ineficiencia y los impactos sobre la ciudad crezcan. La distribución urbana de mercancías se realiza en zonas residenciales que no están diseñadas para acoger este tipo de operaciones de forma masiva, produciendo un ulterior aumento de las externalidades sobre la ciudad y el ciudadano debido a la movilidad urbana (Ragàs, 2018).

Los principales factores que afectan al consumo de combustible son las condiciones del tráfico y la buena práctica de los conductores, siendo la relación

entre estos factores objeto de varios trabajos de investigación (Guo *et al.*, 2019; Makridis *et al.*, 2020). La aplicación de políticas de bajas emisiones de carbono en el transporte urbano de pasajeros tiene beneficios directos para la salud y la mejora de la calidad del aire, por lo que involucrar al ciudadano, y en particular a los conductores, en estrategias de mitigación del cambio climático resulta indispensable. Por otra parte, la reducción de consumos supone ahorros importantes, que en el caso de los operadores de la distribución urbana de mercancías son un elemento clave para su competitividad empresarial.

3. ROL DEL CONDUCTOR EN LA GESTIÓN EFICIENTE DEL VIAJE

El Libro Verde sobre Movilidad Urbana de la Unión Europea (2007) tiene como título “Hacia una nueva cultura de la movilidad”. Ese cambio de cultura supone involucrar a los ciudadanos para que tomen sus decisiones cotidianas de modo sostenible y eficiente; es decir corresponsabilizarles en la gestión eficiente del viaje. Esto supone un enfoque desde el punto de vista de la demanda. Las medidas desde el lado de la oferta tienen un límite (vehículos, redes, sistemas de gestión, carburantes, etc.), por lo que el sistema solamente puede mejorar de modo consistente su eficiencia si el usuario del sistema de transportes contribuye a la solución.

Dalkmann y Branningam (2007) propusieron un marco para mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de GEI del transporte desde el punto de vista de la demanda; es decir, involucrando al ciudadano; es lo que denominan marco ASIF de actuaciones: *Avoid-Shift-Improve-Finance*. *Avoid* se refiere a la reducción del número de viajes y de sus distancias, mediante la integración con los usos de suelo y elección de destinos más accesibles; *Shift* significa cambiar a modos de transporte de menor consumo energético individual; *Improve* se refiere a la creación de estrategias relativas al diseño de vehículos, a la eficiencia del combustible o a la gestión de las operaciones y redes del sistema de transporte; finalmente *Finance* está en línea con facilitar la inversión necesaria para un transporte eficiente. Estrategias para la aplicación de un marco de actuación ASIF la encontramos, entre otros, en Boriboonsomsin *et al.* (2012) y Pérez-Prada, Monzón y

Valdés (2017). Dichas estrategias incluyen la reducción del uso del automóvil y el aumento del transporte público y los modos activos, para mitigar el consumo energético asociado al uso del coche. En las últimas décadas, numerosos estudios se han centrado en investigar cómo reducir el impacto ambiental de la movilidad urbana individual, focalizándose mayormente en modos activos (bicicletas y caminar), vehículos de baja emisión y movilidad compartida (Pérez *et al.*, 2015).

Además del cambio modal y la reducción de viajes, existen otras estrategias de gestión de la demanda, que hacen que los viajes necesarios sean más eficientes. Son las siguientes:

- *Carpooling*– son programas orientados a aumentar el grado de ocupación de los vehículos. Pretenden poner en contacto de modo estable a usuarios con similares itinerarios cotidianos, para compartir voluntariamente su viaje habitual, normalmente al trabajo o por motivo de estudios. Los gestores de dichos programas –*Mobility Manager*– se responsabilizan de que el compañero de viaje sea seguro y, en algunos casos, de aportar un modo de retorno a casa, si hay alguna incidencia que lo impida. Cada agrupación reduce al menos a la mitad las emisiones, que al ser viajes recurrentes supone ahorros significativos.
- *Ride-share*– son programas con una finalidad similar, pero orientados a viajes ocasionales de larga distancia. En este caso el facilitador del contacto se responsabiliza de que se compartan gastos y se constituye en plataforma de pago. La eficiencia crece en función del número de usuarios de cada trayecto, con el incentivo de que se reducen más los costes cuanto mayor es la ocupación del vehículo.
- *Car-sharing*– consisten en flotas cooperativas de alquiler por minutos –con base fija o flotante– que es compartida por un número de usuarios registrados en la plataforma que las oferta. Suelen estar asociados a una marca de automóviles, que lo utiliza para promocionar alguno de sus modelos (Velázquez y Monzón, 2017). En este caso, no aumenta la ocupación de los vehículos, pero reduce la necesidad de su compra, y al tener que pagar por cada servicio, suponen una mayor racionalización de su uso, e indirectamente de las emisiones.

- *Eco-routing*– también conocido como *Green navigation* se refiere a la selección de rutas con menos consumos; supone elegir los tramos con menos congestión, con recorridos en tipos de carreteras con velocidades estables, que contribuyen a un uso eficiente de combustible, o carreteras sin pendientes pronunciadas. Se trata de obtener la ruta de mínimo consumo, en vez de la ruta más rápida, que es lo que habitualmente proporcionan los navegadores (Pérez-Prada, Monzón y Valdés, 2017). Este tipo de rutas pueden facilitar una reducción de emisiones de hasta un 10%, dependiendo del tipo de tráfico de las vías alternativas, pero suponen un mayor tiempo de viaje. Se ha investigado cómo facilitar –a través de GPS– la ruta de mínimo consumo o ecoruta, entre los diversos itinerarios alternativos entre origen y destino del viaje (Fiori, Ahn y Rakha, 2018).
- *Conducción Eficiente (Eco-driving)*– Supone un cambio en el estilo de conducción, siguiendo pautas de reducción de consumos, consistentes esencialmente en limitar aceleraciones/frenadas. Estas técnicas son de amplia aplicación en el transporte de mercancías de larga distancia, donde el combustible puede llegar a suponer el 30% de los costes directos. Los ahorros de consumos pueden llegar al 8%, dependiendo del tipo de vehículo, su carga y trazado del recorrido. Pero las técnicas de conducción eficiente están empezando a utilizarse en la distribución urbana de mercancías y en los coches particulares, por conductores sensibilizados con el medioambiente, y con interés en reducir consumos. A estos dos ámbitos de eficiencia energética se dedica el resto de este documento.

El proyecto europeo ICT-Emissions testó cómo los sistemas ICT (tecnologías de información y comunicación) pueden facilitar las prácticas antes indicadas y producir ahorros significativos de consumo en entornos urbanos. Así los sistemas de control de velocidad por tramos produjeron ahorros del 4%, control de velocidad variable según niveles de congestión del 3,7% y la aplicación de técnicas de conducción eficiente del 7,4% en autopistas y del 12,9% en trayectos urbanos.

4. ECO-DRIVING

Hasta los años 70, el comportamiento de los conductores se ha tratado como un error aleatorio en los modelos de ahorro de combustible de los vehículos de

motor y en la elaboración de políticas relacionadas (Sanguinetti, Kurani y Davies, 2017). Sin embargo, con el tiempo, la literatura ha demostrado que un estilo de conducción “eco” puede ahorrar grandes cantidades de combustible generando impactos positivos no solo en el medio ambiente sino también a nivel social y económico. Desde los años 90, la conducción ecológica surge como una de las principales estrategias para reducir el consumo de combustible y las emisiones de los vehículos.

Sivak y Schoettle (2012) definen la ecoconducción refiriéndose a tres niveles diferentes de toma de decisiones: la elección y mantenimiento del vehículo (nivel

Cuadro 1

Técnicas de conducción ecológica

| Ecoconsejos para una conducción eficiente | |
|---|---|
| Empezar a circular con suavidad, no superando las 1.300 RPM. | Realizar el menor número de cambios de marchas posible. |
| Cambiar a marcha largas lo antes posible, teniendo en cuenta las circunstancias del tráfico y soltando en seguida el embrague. | En circulación urbana tener en cuenta la coordinación de los semáforos. |
| No dar acelerones en frío: el motor se calienta con vehículo en marcha a RPM moderadas. | Cuando hay una pendiente, si las revoluciones se mantienen dentro del par máximo, evitaremos cambiar. |
| Parar el motor en detenciones prolongadas (aprox 60 segundos). En paradas prolongadas, un motor a ralentí consume una media de entre 2 y 0.5 litros por hora. | Reducir, en general, la velocidad de cruce. |
| Reducir, en general, el uso del aire acondicionado. | Evitar aceleraciones y deceleraciones fuertes. No dar acelerones antes de parar el motor. |
| Conducir de forma anticipativa, manteniendo en lo posible la velocidad. | Soltar el acelerador anticipadamente, aprovechando lo más posible la inercia del vehículo. |

estratégico), la elección de ruta y de carga del vehículo (nivel táctico) y las técnicas y el comportamiento de conducción (nivel operacional). En el plano operacional, la conducción ecológica se define como una estrategia que trata principalmente de cambiar los hábitos de conducción y que consigue reducciones

en el consumo de combustible mediante el seguimiento de normas fácilmente tipificadas; es decir, utilizando la inercia del vehículo, acelerando y frenando suavemente, manteniendo una velocidad constante, cambiando de marcha a bajas revoluciones, anticipándose al flujo de tráfico y a la señalización viaria de forma que se eviten arranques y paradas bruscas, etc. (ECOWILL, 2013; Muslim *et al.*, 2018). En el cuadro 1 se muestran los principales ecoconsejos a seguir necesarios para alcanzar el ahorro energético del vehículo.

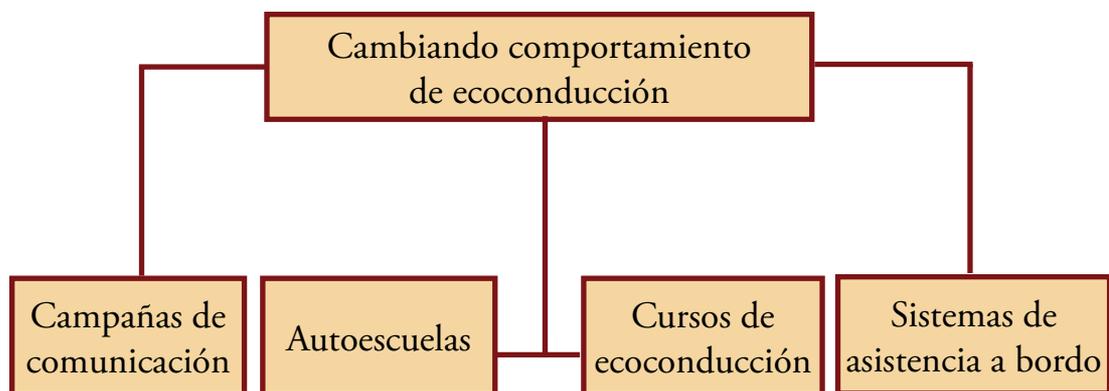
Esta estrategia debe distinguirse del concepto de *hypermiling*. Si bien pueden compartir el mismo objetivo de reducir el coste operativo del vehículo y mejorar su eficiencia energética, difieren en la forma de conseguirlo. Con el *hypermiling* se reduce el consumo de combustible acercándose lo más posible al vehículo que va por delante, suponiendo un intercambio de seguridad por consumo energético, mientras que con la adopción de un comportamiento de conducción ecológica no se perjudica la seguridad (Barkenbus, 2010).

Las ventajas de la ecoconducción van más allá de la reducción de consumos y CO₂, ya que incluyen reducciones en costes de operación y producen beneficios de seguridad tangibles, al reducir la accidentalidad.

Existen cuatro formas principales de promover que los conductores adopten medidas de conducción ecológica: las campañas en los medios de comunica-

Gráfico 5

Estrategias para implementar enseñanza de conducción ecológica



Fuente: García (2018).

ción (televisión, aplicaciones, juegos virtuales, etc.), las autoescuelas, los cursos de conducción ecológica y los sistemas de asistencia a bordo.

La forma más común para promover la ecoconducción consiste en un curso específico que combina clase teórica y clase práctica. Se hace una prueba de conducción antes del curso teórico-práctico seguida por una clase teórica y, una vez aprendidas las técnicas teóricas de conducción eficiente, otra prueba práctica de conducción siguiendo el mismo itinerario de antes. Posteriormente, se analizan, mediante la tecnología instalada en los vehículos, los resultados obtenidos en el consumo de combustible en ambos tipos de conducción, así como el número de cambios de marcha o de aceleraciones fuertes dependiendo de la instrumentación del vehículo (Wang y Boggio-Marzet, 2018; Coloma *et al.*, 2020).

Para evaluar el impacto de la conducción ecológica, se utilizan ampliamente dos enfoques: pruebas de campo y simulaciones de tráfico. La literatura muestra una gran variabilidad de resultados según el contexto: desde un 2% hasta un 7% de ahorro medio de consumo, ascendiendo hasta más del 25% de ahorro individual en determinadas condiciones (Ho, Wong y Chang, 2015; Sanguinetti, Kurani y Davies, 2017). En general, el ahorro de combustible es positivo siempre que se cumpla un programa de formación teórico-práctico. El trabajo de Xia, Boriboonsomsin y Barth (2013) delinea las ventajas e inconvenientes de la conducción ecológica, así como la gran variabilidad de resultados dependiendo de la heterogeneidad de los conductores, de las rutas y de otros factores.

La investigación de Andrieu y Saint-Pierre (2012) muestra que la disminución media del consumo de combustible después de dar una simple clase teórica (12,5%) fue ligeramente mayor que después de una formación práctica de corta duración (11,3%). Sin embargo, el tipo de carretera y los vehículos utilizados para comparar los dos aspectos –teórico y práctico– eran diferentes, lo que hace que los resultados no sean comparables. Por otro lado, Schall, Wolf y Imohnen (2016) afirman que, según su estudio, la formación puramente teórica no tiene efectos permanentes si no se complementa con la formación práctica.

La influencia de los efectos de la ecoconducción por tipo de carretera está poco estudiada, aunque muchos ensayos incluyen varios tipos de carretera. Por otra

parte, los experimentos en carretera se ven afectados de manera significativa por ciertas condiciones de tráfico y tipologías específicas de diseño y trazado de la carretera. La mayoría de los ensayos de campo recorren distancias cortas, con características de tráfico simples o controladas, para evitar la influencia de factores externos (Zarkadoula *et al.*, 2007; Rutty *et al.*, 2013). Los resultados de estos experimentos ignoran la influencia del tráfico real, en el que los conductores que conducen de forma ecológica siempre encuentran una mezcla de diferentes tipos de carretera y condiciones de tráfico. Además, ya que la tipología de los vehículos es uno de los principales factores que afectan al consumo de combustible, es conveniente comparar vehículos de características diferentes.

También resulta interesante tener en cuenta que el comportamiento de los conductores es diferente según el tiempo transcurrido desde la formación recibida en conducción ecológica (Stillwater, Kurani y Mokhtarian, 2017). En los estudios realizados inmediatamente tras la realización del curso de conducción ecológica se ha obtenido un cambio medio mayor en ahorro de combustible (hasta un 10%) que en los estudios realizados después de haber pasado un tiempo mayor.

A pesar de constatarse la eficiencia en ecoconducción en condiciones ideales, para cuantificar los impactos reales de esta técnica en términos de ahorro en consumos, hay que realizar tanto pruebas de campo como simulaciones de tráfico. La conducción ecológica puede ser una buena medida para reducir las emisiones y ahorrar en consumo energético; sin embargo, muy pocas de estas investigaciones se dirigen a la influencia de la conducción eficiente en el flujo de tráfico y a si esta influencia varía con el nivel de congestión y con el número de conductores que realizan ecoconducción (García-Castro *et al.*, 2017).

5. ECO-DRIVING EN CIUDADES: EL CASO DE MADRID

Tanto la conducción ecológica como la elección de ecoruta, aquella con menor consumo de combustible, son soluciones eficientes de muy bajo coste para la gestión ambiental de las carreteras. En 2016, en el marco del programa estatal de I+D+i sobre “Transporte inteligente sostenible e integrado” se desarrolló el proyecto ECO-TRAFFIC: *medición y modelización de eco-driving táctico y operacional: efectos sobre la reducción de GEI y contaminantes*. El principal objetivo

era evaluar la conducción eficiente y su aceptabilidad entre los conductores, así como investigar el potencial de la ecoconducción junto a la elección de ruta en términos de ahorro energético y reducción de GEI. A continuación se describen los principales resultados obtenidos en dicho proyecto.

La base de la investigación fueron dos trabajos de campo en el área metropolitana de Madrid. Uno se realizó con coches particulares y otro con vehículos comerciales, gracias a la colaboración de Correos. Durante las dos campañas de toma de datos se recopilaban datos reales relacionados con los parámetros de comportamiento de conducción y consumo de combustible, antes y después de que los conductores asistieran a un curso de conducción eco, en diferentes condiciones de tráfico, para luego procesarlos, filtrarlos y analizarlos estadísticamente en función de diferentes parámetros. A pesar de la similitud del trabajo de campo en cuanto a organización e instrumentos, las dos campañas resultaron totalmente diferentes en cuanto a la tipología de curso de conducción eco, el perfil del conductor, el tiempo de viaje, los vehículos implicados y las rutas recorridas, prefijadas en el caso de vehículos particulares y variables para los conductores profesionales.

En los siguientes apartados se describen las dos campañas de toma de datos reales, así como el análisis de los resultados, necesario para identificar los efectos del *eco-driving* sobre la reducción de consumo energético de un vehículo. A pesar de que el número de conductores participantes es reducido (11 y 13, respectivamente para la campaña de vehículos particulares y comerciales), se obtuvo una gran cantidad de datos recogidos a lo largo de los recorridos efectuados, de 6.763 km y 7.262 km, respectivamente.

5.1. *Eco-Driving* en movilidad de pasajeros

■ Campaña de toma de datos en Madrid

El experimento tuvo lugar en abril y mayo de 2017, y para ello se utilizaron dos vehículos ligeros: un Opel Astra (diésel) y un Fiat 500 (gasolina). Durante un mes los conductores conducían los vehículos iterativamente a lo largo de diferentes itinerarios preestablecidos con una longitud media de 11 km, que comprendían tanto carreteras locales como arterias urbanas y autopistas. Los coches, de tecno-

logía Euro 5, pertenecen a los segmentos pequeño y medio, respectivamente, a los que corresponden aproximadamente al 60% de la flota española (Dirección General de Tráfico, 2016). En cada vehículo se instaló un dispositivo de registro a bordo (OBD-Key) para controlar los parámetros clave de conducción durante los dos períodos experimentales, antes y después de que los conductores asistieran a un curso de conducción eficiente.

Para poner en práctica la conducción ecológica a nivel operacional, un instructor de una autoescuela impartió una clase de conducción ecológica a los conductores participantes, seguida por una clase práctica individual. El análisis de una serie de indicadores clave de rendimiento permitió evaluar el rendimiento de los conductores durante la formación y el impacto del curso sobre el ahorro energético de los recorridos del experimento.

Para obtener el consumo instantáneo de energía de cada vehículo se aplicó el modelo *VSP-Vehicle Specific Power* (Jiménez-Palacio, 1998), un método validado en la literatura que caracteriza los vehículos y el comportamiento del conductor a partir de datos reales y puede utilizarse para diferentes tipos de vehículos motorizados: motos, autobuses, coches particulares etc. (Carrese, Gemma y La Spada, 2013; Cheng *et al.*, 2018; Murena, Prati y Costagliola, 2019; Faria, Baptista, Farias y Pereira, 2020).

■ Efectos de la ecoconducción en función del tipo de coche y de conductor

El estudio utilizó dos vehículos diferentes, de tamaño y tipo de propulsión. Se obtuvieron mejores resultados con el coche de gasolina, logrando una reducción media del 7,6% en el consumo medio de combustible, en comparación con un promedio del 4,7% con el vehículo diésel. Con respecto a los conductores, había una cierta heterogeneidad entre los once participantes en el experimento: cuatro mujeres de entre 24 y 56 años, y siete hombres de entre 23 y 42. En promedio, los hombres realizaron un poco mejor la conducción ecológica que las mujeres, logrando un 6% y 4% reducción del consumo medio de combustible, respectivamente.

También se comprobó el influyo de la experiencia como conductor: de menos de 7 años a más de 20 años. La reducción del consumo medio fue bastante similar,

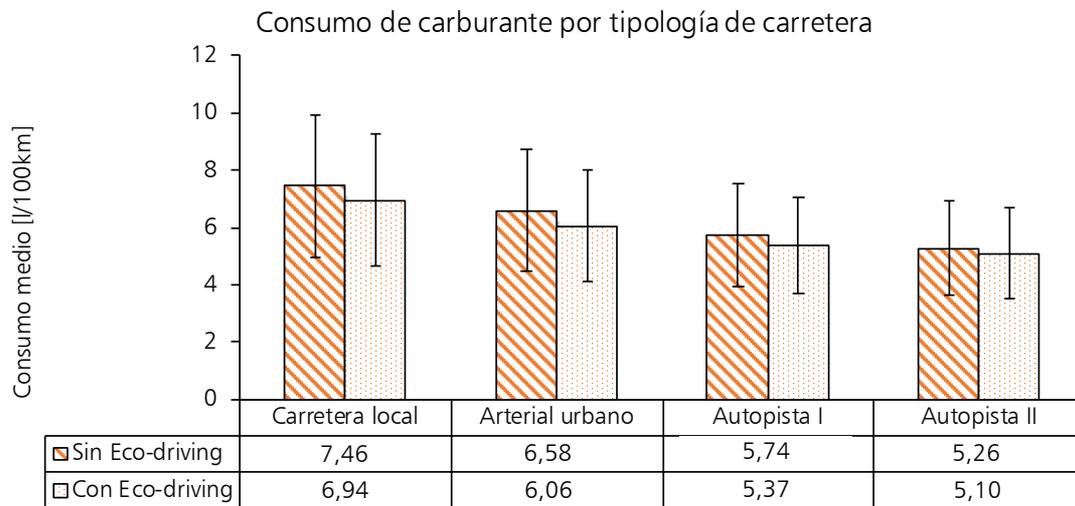
5% y 4% respectivamente, pero los conductores con menos experiencia tuvieron consumos un 5% menor que los conductores con más de 20 años de experiencia, independientemente de si adoptaran la conducción ecológica o no. Es importante subrayar que, siendo una conducta de uso de coche, la conducción ecológica se comporta de forma diferente dependiendo del conductor. Considerando los diferentes perfiles de los conductores, el ahorro en el consumo instantáneo de combustible varió hasta el 12%. Aunque no todos los conductores involucrados en el experimento redujeron su consumo de combustible, su comportamiento de conducción cambió positivamente después de participar en el curso de conducción eficiente, adoptando un estilo de conducción más suave y tranquilo.

■ Efectos de la ecoconducción en función del tipo de vía

El gráfico 6 muestra los cambios en el consumo de combustible sin y con conducción ecológica, para los cuatro tipos de carretera cubiertos por los itinerarios del

Gráfico 6

Efectos de la ecoconducción por tipología de carretera



Fuente: Wang y Boggio-Marzet (2018).

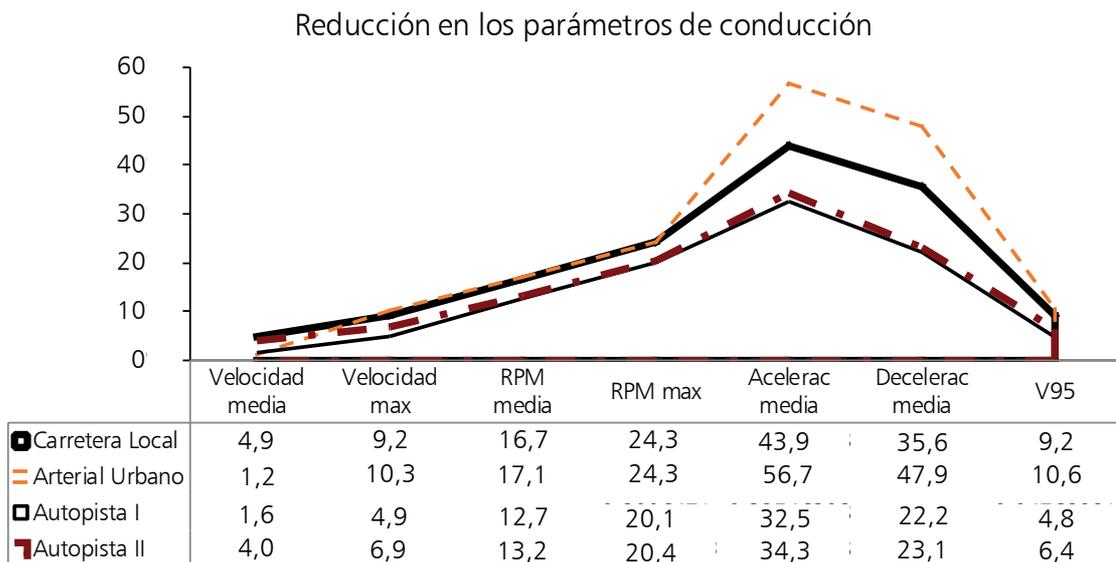
ensayo. El mayor ahorro correspondió a las arterias urbanas (8%). Los consumos son mayores en las autopistas que en las calles locales, por la mayor velocidad. A pesar de ello, la eficiencia energética del vehículo es significativamente mejor

en las carreteras de mayor velocidad que en las carreteras locales, lo que también contribuye a una mejor eficiencia de conducción ecológica. Cuando los conductores tienen menos control del vehículo, hacen que la velocidad y los cambios de marcha varíen frecuentemente para adaptarse a las condiciones de tráfico, lo que explica la mayor desviación estándar del consumo instantáneo de combustible registrado en los sectores de carreteras locales (tanto en el período sin *eco-driving* como en el con *eco-driving*).

Las variaciones de ahorro de combustible entre los cuatro tipos de carretera pueden explicarse por los cambios en el comportamiento de conducción producidos por la aplicación de técnicas de conducción ecológica. En el gráfico 7 se muestran los cambios de comportamiento logrados al comparar los dos períodos de conducción experimental, lo que responde a la pregunta de en qué medida las diferentes características de la carretera influyen en el comportamiento del conductor y en el ahorro de combustible mediante la conducción ecológica.

Gráfico 7

Efectos de la conducción ecológica sobre el comportamiento del conductor



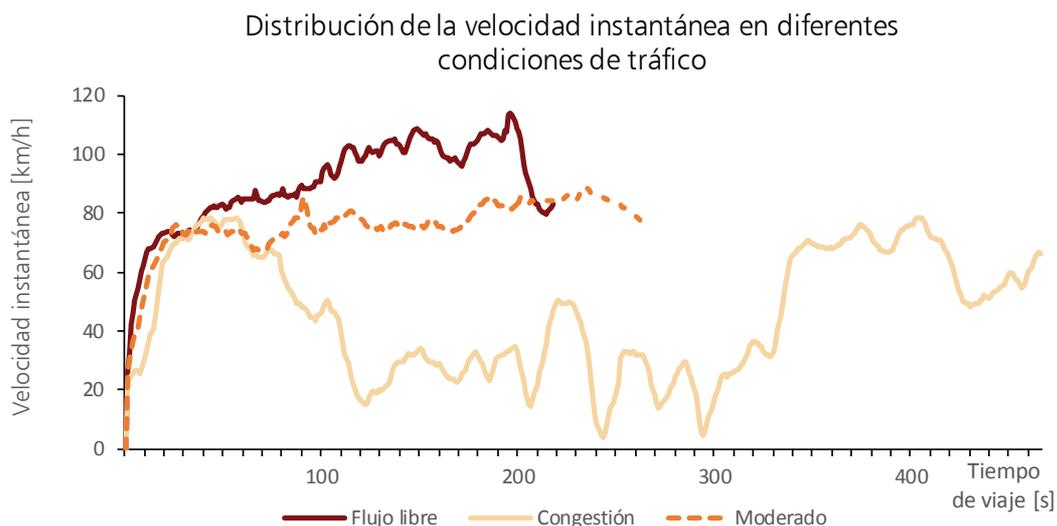
Fuente: Wang y Boggio-Marzet (2018).

En general, la reducción media en el consumo de combustible que se logró a través de la conducción ecológica fue del 6,3%. Se observa un efecto positivo de la conducción ecológica en el cambio de los comportamientos habituales de los conductores en todos los tipos de carreteras. Más en concreto, los conductores reducen considerablemente las aceleraciones y deceleraciones fuertes en todo tipo de carreteras. Las revoluciones del motor y la velocidad, que son parámetros que influyen directamente sobre el consumo de combustible (Lois *et al.*, 2019), se reducen de forma significativa con la conducción eficiente. Además, se mantuvo una velocidad más constante durante el periodo de conducción con la eco conducción.

Por tanto, los resultados muestran que la conducción ecológica funciona mejor en las arterias principales en comparación con otros tipos de vías, lo que coincide con los resultados obtenidos en cuanto al ahorro de combustible. Es necesario subrayar que estos sectores se caracterizan por límites de velocidad de 50 km/h y por una serie de rotondas, e intersecciones. En este caso, la diferencias en las pautas de conducción ecológica registradas en la Autopista I y la Autopista II (que se

Gráfico 8

Comparación del tiempo de viaje necesario para cubrir el mismo sector de autopista, de 6 km de longitud, con diferentes situaciones de tráfico



Fuente: Elaboración propia.

diferencian por el límite de velocidad, de 120 km/h y de entre 90 y 120 km/h, respectivamente) se explican por la diferente velocidad operativa. A lo largo de estos tipos de vías, la limitación de la velocidad no sólo afecta al consumo de combustible, sino también al potencial de ahorro mediante la técnica de conducción eficiente.

■ Efectos de la ecoconducción en función de las condiciones del tráfico

Las principales pautas de un viaje específico pueden variar considerablemente en diferentes condiciones de tráfico, como se muestra en el ejemplo siguiente, que muestra las diferencias en el tiempo de viaje y la velocidad instantánea registrada a lo largo de un mismo segmento de carretera (con un tramo de carretera clasificado como Autopista I, desde el acceso hasta el final del segmento) en función de las condiciones del tráfico.

Como se muestra en el gráfico 8, el tiempo de viaje puede aumentar considerablemente debido a los diferentes niveles de tráfico, si se comparan las condiciones de flujo libre con las de congestión. En el mismo sector de autopista, de 6 km de longitud, el tiempo de viaje aumenta en más del 100% en caso de congestión, así como el tiempo necesario para recorrer dicha distancia, con una velocidad media de 45 km/h y 90 km/h respectivamente. Las condiciones del tráfico influyen tanto en la velocidad operativa como en otras pautas de conducción importantes, que influyen directamente en el consumo de combustible y en las emisiones, aunque dependen del tramo de carretera (Lois *et al.*, 2019).

En las carreteras de mayor capacidad, las condiciones de tráfico extremadamente congestionadas reducen la velocidad instantánea media hasta un 65%. Los datos muestran que el paso de condiciones de flujo libre a condiciones de congestión del tráfico afecta a las pautas de conducción y a la velocidad operativa de forma diferente en el caso de las carreteras de alta o baja capacidad. En los segmentos de carreteras de menor capacidad, la velocidad operativa está más influenciada por la alineación y la geometría de la carretera que por las condiciones del tráfico. En las carreteras de gran capacidad, las condiciones de tráfico desfavorables dan lugar a un aumento de la covarianza de la velocidad (variabilidad de la velocidad) de hasta el 73%, mientras que en las carreteras de baja capacidad solamente es de un

31%. Por otra parte, en las carreteras locales es más difícil aplicar la conducción ecológica, ya que el comportamiento al volante está fuertemente influenciado por la geometría de la carretera. García-Castro *et al.* (2017) afirman que, en las zonas urbanas caracterizadas por una alta congestión, los efectos de la conducción ecológica son prácticamente indetectables, de hecho, a menudo resulta imposible aplicar los ecoconsejos (cuadro 1) debido a la típica geometría urbana segmentada. Las técnicas de conducción ecológica deben promoverse mayormente en las carreteras extraurbanas de mayor capacidad ya que es más fácil controlar el comportamiento de conducción en condiciones de flujo libre.

5.2. *Eco-driving* en logística urbana

■ Campaña de toma de datos en Madrid

Para la campaña de toma de datos en logística urbana se pudo contar con el apoyo de Correos, la compañía de servicio postal nacional de España. Con la colaboración de dicha compañía, se ha llevado a cabo la campaña para estudiar el efecto que tiene un curso de conducción ecológica en conductores profesionales y analizar las características operativas urbanas y suburbanas en las entregas de última milla.

El experimento se realizó simultáneamente en un área de reparto urbano y en un área de reparto suburbano, dentro de la misma área metropolitana de Madrid. Ambas áreas tienen características diferentes en la red de calles/carreteras que utilizan: homogéneas dentro del área de reparto urbana y heterogéneas en el caso del área suburbana. La flota de vehículos se componía, en ambos casos, de vehículos ligeros diésel y eléctricos del mismo fabricante y modelo. Además, considerando dos áreas diferentes dentro del Área Metropolitana de Madrid, las características socioeconómicas son similares.

Los conductores involucrados en el experimento fueron trece, con edades comprendidas entre 33 y 62 años, incluyendo dos mujeres y once hombres. Siete conductores son empleados del centro de distribución urbana, y seis forman parte del equipo del centro de distribución suburbano. Además, como conductores profesionales, tienen una experiencia de conducción bastante larga, que oscila

entre 10 y 42 años (media=28,6), variable que tiene su influencia en el ahorro energético alcanzado durante el experimento.

Durante un mes, los trece conductores profesionales condujeron sus furgonetas comerciales siguiendo sus normales rutas de entrega. Cada vehículo estaba oportunamente equipado para que se registrasen instantáneamente decenas de parámetros relacionados con el sistema de motor, con las circunstancias externas y las características del camino recorrido (tipología de carretera, posicionamiento GPS, etc.) y con el estilo de conducción (p.e. aceleraciones, velocidad, covariancia de la velocidad, etc.). Después de las dos primeras semanas de experimento, todos los conductores asistieron a un curso de conducción eficiente (ecoconducción).

A diferencia del caso de los conductores no profesionales, el curso de conducción eficiente consistió en unas dos horas de formación teórica solamente y se llevó a cabo en la unidad de entrega donde trabajan los conductores. No obstante, el curso fue bastante dinámico, una clase inicial estuvo dedicada a la toma de conciencia de los impactos ambientales, económicos y sociales del comportamiento de conducción y después a explicar los ecoconsejos más eficaces.

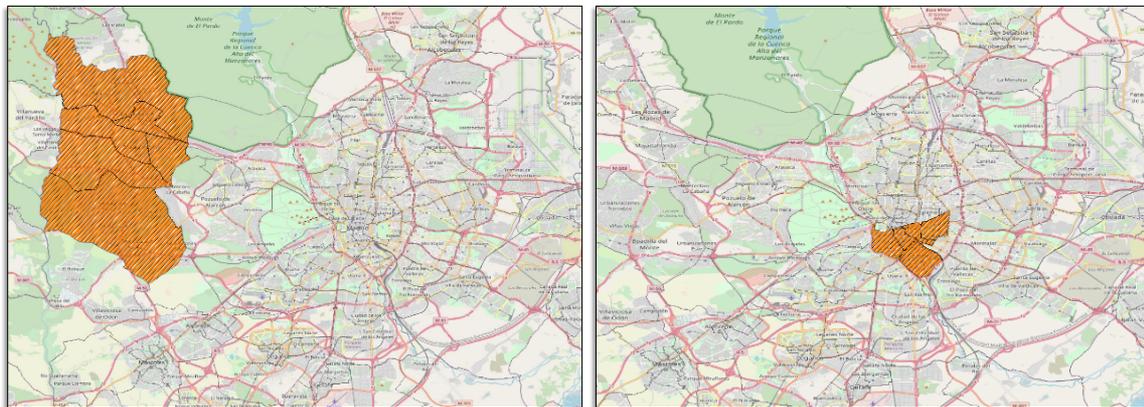
Los dos contextos de distribución proporcionados por Correos fueron los siguientes: área de reparto situada en Las Rozas de Madrid (contexto suburbano), cubriendo una zona de reparto de más de 130 km² caracterizada por una densidad de 698 hab./km²; la otra, situada en el centro de la ciudad de Madrid (contexto urbano), cubre una zona de reparto ligeramente superior a 12 km² y está caracterizada por una densidad de 21.011 hab./km². En el mapa 1 se presentan las dos áreas.

Cabe destacar que el área urbana es diez veces más pequeña que el área de entrega suburbana, pero su densidad de población es treinta veces mayor. A través de los datos recopilados de las dos zonas de entrega, emerge que el contexto geográfico no solo lleva a un rendimiento de entrega distinto, sino que también refleja diferentes efectos de la conducción eficiente.

En cuanto a las rutas de la campaña, cada conductor en general tiene sus propias microzonas de servicio, pero las rutas de conducción varían cada día en función

Mapa 1

Área de reparto urbano y suburbano en Madrid



de los paquetes asignados por el centro de distribución. A través del proceso de datos, se ha podido caracterizar el comportamiento de conducción y los efectos de la conducción eficiente diferenciando por tipología de carretera.

■ Efectos de la ecoconducción en función del área de distribución

Las características de los repartos de última milla son bastante diferentes según la zona de reparto considerada. Teniendo en cuenta el conjunto de datos de los viajes diarios y considerando la suma diaria de consumo energético, un primer análisis sobre el impacto de la conducción ecológica en el ahorro de consumo energético muestra lo siguiente: el ahorro energético alcanzado a través de la conducción eco en rutas de reparto varía según el área de reparto, las rutas implicadas y la tipología de vehículo.

La aplicación de pautas de conducción ecológica ha dado resultados positivos de ahorro energético en general. En la zona suburbana, los conductores de vehículos diésel lograron una reducción media de combustible equivalente al 6% después del curso de conducción ecológica. Los efectos de la conducción ecológica en el área urbana son también positivos, tanto para los vehículos eléctricos como para los diésel, suponiendo un ahorro energético del 9% en el caso de los vehículos eléctricos.

Cabe destacar que en área urbana la reducción del consumo energético alcanzada por los vehículos diésel (3.5%) es muy similar a la lograda por los conductores de vehículos privados a lo largo de las carreteras urbanas en el experimento de 2017 (4%). Como consecuencia del nivel de congestión y condiciones de circulación en zona urbana, los conductores tienen más dificultades para aplicar la conducción ecológica o alterar sus hábitos de conducción habituales, ya que tienen que maniobrar el vehículo continuamente. A pesar de esto, del experimento se concluye que la ecoconducción produce en media un ahorro energético diario de entre un 3% y un 9%, dependiendo de la zona de entrega.

Durante el mismo turno de trabajo, un conductor profesional encargado de cubrir la zona urbana cruzaba diferentes calles, pero mayormente homogéneas entre ellas en cuanto a ancho, capacidad y límite de velocidad (vias locales). Por otro lado, en el área suburbana, un mismo turno de trabajo podía cubrir rutas compuestas por tramos de autopistas, así como carreteras locales, caracterizadas por límites de velocidad entre 30 km/h y 120 km/h. Según la zona de entrega, urbana o suburbana, los microviajes para las entregas de paquetes pueden hacerse a lo largo de carreteras más o menos homogéneas caracterizadas por una sección constante o variable, cada entrega a varios kilómetros o a unos pocos cientos de metros de distancia. En este contexto, resulta claro que no se puede comparar el consumo energético de un microviaje en carreteras locales con otro en autopistas o arterias urbanas. Para estudiar mejor el efecto del curso de conducción eficiente y comparar microviajes similares, se ha efectuado un análisis clúster para identificar grupos de microviajes de entrega similares, cada uno caracterizado por diferentes rangos de velocidad operativa y de consumo energético. Los resultados se presentan en el siguiente apartado.

■ Efectos de la ecoconducción en función del vehículo y del microviaje

El apartado anterior se ha centrado en el análisis de la eficiencia del *eco-driving* en general, comparando turnos de conducción completos (cada uno alrededor de 4 horas de duración, correspondiente a un turno de trabajo) comparando antes y después del curso de *eco-driving*. El análisis clúster sobre el conjunto de los microviajes diferencia entre las áreas de reparto urbana y suburbana. Para cada área, se identifican tres grupos de microviajes dentro de toda la muestra. De los

Cuadro 2

Características de los microviajes de reparto de mercancía y eficiencia energética

| | | Características de microviaje | | | | | Eficiencia energética | | | | | |
|-------------------|----|-------------------------------|-------------------|-------------------------|---------------|---------------------|------------------------------|------|-----|-----------------------------------|------|------|
| | | Micro- viajes (Nº) | Distancia (km) | Tiempo parado (%) | V95 (km/h) | Velocidad (km/h) | Vehículo diésel (l/100km) | | | Vehículo eléctrico (kWh/100km) | | |
| Área suburbana | S1 | 842 | 0,65 | 11 | 29,4 | 17,3 | 7,3 | 5,4 | -26 | 38,2 | 33,2 | -13* |
| | S2 | 248 | 1,24 | 6 | 88,4 | 36,8 | 5,7 | 5,6 | -2 | 9,6 | 11,6 | 20* |
| | S3 | 1.142 | 2,35 | 8 | 48,3 | 27,8 | 7,2 | 6,6 | -8 | 28,2 | 27,1 | -4* |
| Área urbana | U1 | 781 | 0,39 | 27 | 19,5 | 7,0 | 10,6 | 10,4 | -2 | 47,8 | 42,1 | -12 |
| | U2 | 561 | 1,46 | 16 | 48,9 | 20,1 | 6,2 | 6,0 | -3 | 39,1 | 37,4 | -4 |
| | U3 | 905 | 0,67 | 19 | 32,3 | 13,3 | 7,5 | 7,1 | -5 | 44,5 | 39,9 | -10 |

* Para el caso del coche eléctrico en área suburbana, la muestra del periodo sin/con eco no es equilibrada: los resultados no son muy significativos

4.479 microviajes que se consideran para el análisis, el análisis clúster llevó al cuadro 2.

Existe una simple, pero fundamental, diferencia entre los centros de distribución urbanos y suburbanos, en lo que respecta a las características de los microviajes de entrega de paquetes individuales: el 50% de los microviajes de entrega en el área urbana no supera los 497 metros de longitud, mientras que en área suburbana el 50% de los microviajes son de más de 1.078 metros. Entre otros, estos aspectos sugieren que el área de entrega realmente influye en las características de conducción, lo que resulta ser determinante a la hora de evaluar la eficiencia energética en logística urbana. De hecho, el promedio del consumo energético propio de las entregas de última milla en área de reparto urbana o suburbana muestra una gran diferencia, así como el ahorro energético alcanzado tras la aplicación de la conducción ecológica (cuadro 1). La energía consumida durante cada ruta de entrega resulta mayor en el área de reparto urbana respecto a la suburbana. En el mismo cuadro 2 se muestra también el ahorro de energía logrado mediante la aplicación de la conducción ecológica. Se puede observar que los mayores ahorros de consumo energético tras aplicar la ecoconducción se han logrado en el grupo S1, caracterizados por microviajes efectuados dentro del área suburbana manteniendo una moderada velocidad de circulación.

Este resultado es coherente con los resultados obtenidos en el experimento realizado con conductores no profesionales de automóviles: la conducción ecológica es más eficiente en vías extraurbanas, ya que el estilo de conducción resulta ser menos afectado por la geometría de las carreteras y el funcionamiento de la red de carretera circunstante (intersecciones, glorietas, peones, semáforos, etc.).

Con respecto al vehículo, los mejores resultados de la ecoconducción se han conseguido con los vehículos diésel en la zona de reparto suburbana, y para vehículos eléctricos en la zona de reparto urbana. Las dos muestras son similares, lográndose un ahorro de consumo energético tras la ecoconducción de hasta un 12% en el caso de vehículos eléctricos en área urbana, y del 26% en el caso de vehículos diésel en el área suburbana.

Los resultados obtenidos durante la campaña de recopilación de datos sugieren que, para percibir mejor los beneficios (ambientales y económicos) producidos por la conducción ecológica, los centros de distribución de mercancías en ciudades deberían formar a todos sus conductores en las técnicas de ecoconducción, ya que, aunque la eficiencia varía con el conductor, los ahorros energéticos son significativos en la mayor parte de los casos.

6. CONCLUSIONES

En primer lugar, cabe afirmar que se necesita una acción más decidida para reducir las emisiones provenientes del transporte por carretera, en particular en la movilidad urbana. Resulta necesario gestionar la demanda e involucrar al ciudadano para alcanzar los ambiciosos objetivos de mitigación de emisiones. El sector transporte es un sector difuso, por lo que las medidas desde la oferta tienen un impacto limitado, siendo preciso cambiar los hábitos de los usuarios.

Se ha identificado el potencial de medidas de bajo coste que tienen un impacto relevante sobre los consumos energéticos: aumento de la ocupación de los vehículos (*carpooling*), reducción de la flota circulante (*ridesharing* y *carsharing*), optimizar rutas según consumos en vez de tiempos (*green-navigation*) y finalmente una forma de conducción más eficiente (*eco-driving*).

Se ha analizado, en el caso de Madrid, qué impacto podría tener la conducción eficiente, tanto viajeros como mercancías, en ámbitos urbanos y suburbanos, y según tipología de carretera. A tal fin se han desarrollado casos de estudio reales para demostrar la eficiencia de la conducción eficiente sobre el consumo energético.

Los resultados obtenidos del experimento con vehículos de pasajeros permiten concluir que el ahorro de combustible llega hasta un 6,5%, independientemente del tipo de combustible y del tipo de vía: los cursos de formación en conducción ecológica modifican significativamente los hábitos de los conductores, reduciendo el consumo energético. Los parámetros de conducción analizados en el estudio varían significativamente con la práctica de *eco-driving*: se comprueba que los conductores conducen más suavemente, aceleran y desaceleran menos agresivamente, y se reducen las paradas innecesarias a lo largo del recorrido, lo que se traduce en un ahorro de consumos.

La práctica de *eco-driving* en la distribución logística reduce las paradas innecesarias en un 5-6%, las aceleraciones y desaceleraciones bruscas hasta un 15%, y el 11% de la covarianza de la velocidad.

Los mayores ahorros de combustible se producen en las carreteras extraurbanas, tanto para viajes en automóvil como furgonetas de distribución logística. En vías locales con alta intensidad de tráfico los conductores tienen más dificultades para aplicar las técnicas de *eco-driving*, ya que ésta depende en gran medida de causas externas, que a menudo no se pueden controlar. Con la conducción eco se reducen de forma generalizada los parámetros de consumo en todo tipo de conductores, pero se constata que esta reducción es más relevante en conductores con menor experiencia. Por tanto, sería conveniente establecer políticas de formación en conducción eficiente en las autoescuelas y conductores noveles, cuya capacidad de aprendizaje es mayor que en conductores ya experimentados. Así mismo, los cambios en el comportamiento de conducción son más acusados en conductores no profesionales, ya que éstos tienen una limitación de horarios de reparto y turnos de trabajo.

La conducción ecológica supone un cambio en los parámetros de consumo: revoluciones del motor, velocidad media y su variabilidad, aceleración positiva/nega-

tiva. Se han observado mejoras en estos parámetros de hasta el 63% en ciertas circunstancias. Además de las pautas de conducción, el consumo energético resulta fuertemente influenciado por causas externas como la intensidad de tráfico o tipo de vía. Los resultados sugieren que las mejores tipologías de carretera para implementar *eco-driving* son las periurbanas, caracterizadas por límites de velocidad superiores y condiciones de flujo libre, tanto para vehículos de pasajeros como para vehículos comerciales, alcanzándose niveles de reducción de hasta el 26%.

Basándonos en los resultados positivos obtenidos los casos de estudio, cabe afirmar la importancia del papel que desempeñan los conductores en la reducción de emisiones de sus vehículos, en las diferentes condiciones de tráfico, y tipo de vía. Por ello, las autoridades competentes en gestión de tráfico deberían promover este tipo de conducción entre los ciudadanos, concienciando de sus efectos beneficiosos. Llevar a cabo acciones de sensibilización para promover la conducción ecológica y seleccionar rutas de emisiones mínimas, son acciones de gran potencial para alcanzar los objetivos de mitigación y sostenibilidad urbana.

REFERENCIAS

ALONSO A., MONZÓN A. y CASCAJO R. (2018). Measuring Negative Synergies of Urban Sprawl and Economic Crisis over Public Transport Efficiency: The Case of Spain. *International Regional Science Review*, 41(5), pp. 540-576.

ANDRIEU, C. y SAINT PIERRE, G. (2012). Comparing effects of eco-driving training and simple advices on driving behavior. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, pp. 211-220,

BANCO MUNDIAL. (2017). *World development indicators – urban population*. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS>

BORIBOONSOMSIN, K., BARTH, M. J., ZHU, W. y VU, A. (2012). Eco-routing navigation system based on multisource historical and real-time traffic information. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13 (4), pp. 1694–1704.

CARDENAS, I., BORBON-GALVEZ, Y., VERLINDEN, T., VAN DE VOORDE, E. y VANELSLANDER, T. (2017). City logistics, urban goods distribution and last mile

delivery and collection. *Competition and Regulation in Network Industries*, 18, 1-2, pp. 22-43.

CARRESE, S., GEMMA, A. y LA SPADA, S. (2013). Impacts of driving behaviours, slope and vehicle load factor on bus fuel consumption and emissions: A real case study in the city of Rome. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 87, pp. 211-221.

COLOMA, J. F., GARCIA, M., BOGGIO-MARZET, A. y MONZON, A. (2020). Developing Eco-Driving Strategies considering City Characteristics. *Journal of Advanced Transportation*.

CHENG, Z., WANG, W., LU, J. y XING, X. (2018). Classifying the traffic state of urban expressways: A machine-learning approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.

DALKMANN, H. y BRANNIGAN, C. (2007). Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities. Transport and Climate Change. Module 5e. Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ 2007).

DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO. (2016). *Parque de vehículos por provincias*. Disponible en: <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/tablas-estadisticas>

ECOWILL FINAL REPORT. (2013). The golden rules of eco-driving. Disponible en: http://cieca.eu/sites/default/files/documents/projects_and_studies/ECOWILL_FINAL_REPORT.pdf

EEA, EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (2020). *Greenhouse gas emissions from transport in Europe*. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases/transport-emissions-of-greenhouse-gases-12>

— (2019a). Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2017 and inventory report 2019. EEA/PUBL/2019/051. Disponible en: <https://www.eea.europa.es/publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2019>

— (2019b). National action across all sectors needed to reach greenhouse gas Effort Sharing targets, 2019. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/publications/national-action-across-all-sectors>

EUROPEAN COMMISSION. (2019). *The European Green Deal*. Disponible en: https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf

EUROSTAT. (2020). *Greenhouse gas emission statistics-emission inventories*. Disponible *online* en: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/1180.pdf>

FARIA, M. V., BAPTISTA, P. C., FARIAS, T. L. y PEREIRA, J. M. (2020). Assessing the impacts of driving environment on driving behavior patterns. *Transportation*, 47(3), pp. 1311-1337.

FIORI, C., AHN, K. y RAKHA, H. A. (2018). Microscopic series plug-in hybrid electric vehicle energy consumption model: model development and validation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, pp. 175- 85.

GARCIA-CASTRO, A., MONZÓN, A., VALDÉS, C. y ROMANA, M. (2017). Modeling different penetration rates of eco-driving in urban areas: Impacts on traffic flow and emissions. *International Journal of Sustainable Transportation*, 11(4), pp. 282-294.

GUO, D., WANG, J., ZHAO, J. B., SUN, F., GAO, S., LI, C. D. y LI, C. C. (2019). A vehicle path planning method based on a dynamic traffic network that considers fuel consumption and emissions. *Science of the Total Environment*, 663, pp. 935-943.

HO, S.H., WONG, Y. D. y CHANG, V. C. (2015). What can eco-driving do for sustainable road transport? Perspectives from a city (Singapore) *eco-driving* programme. *Sustain Cities Soc*, 14, pp. 82–88.

LIBRO VERDE. (2007). *Hacia una nueva cultura de la movilidad urbana*. Bruselas: Comisión de las Comunidades Europeas.

LOIS, D., WANG, Y., BOGGIO-MARZET, A. y MONZON, A. (2019). Multivariate analysis of fuel consumption related to eco-driving: Interaction of driving

patterns and external factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, pp. 232-242.

MACHARIS, C. y LEBEAU, P. (2014). Freight transport in Brussels: What impact on car traffic? *Brussels Studies*, 80, pp. 1-14.

MACHARIS, C. y NOCERA, S. (2019). The future of freight transport. *European Transport Research Review*, 11, p. 21.

MAKRIDIS, M., MATTAS, K., CIUFFO, B., RE, F., KRISTON, A., MINARINI, F. y ROGNELUND, G. (2020). Empirical study on the properties of adaptive cruise control systems and their impact on traffic flow and string stability. *Transportation research record*, 2674(4), pp. 471-484.

MINISTERIO DE FOMENTO. (2007). Movilia. Disponible en: <https://apps.fomento.gov.es/BoletinOnline2/?nivel=2&orden=27000000>

MURENA, F., PRATI, M. V. y COSTAGLIOLA, M. A. (2019). Real driving emissions of a scooter and a passenger car in Naples city. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, pp. 46-55.

MUSLIM, N. H., KEYYANFAR, A., SHAFAGHAT, A., ABDULLAHI, M. M. y KHORAMI, M. (2018). Green driver: travel behaviors revisited on fuel saving and less emission. *Sustainability*, 10(2), p. 325.

PÉREZ, L., TRÜEB, S., COWIE, H., KEUKEN, M. P., MUDU, P., RAGETTLI, M. S. y SABEL, C. (2015). Transport-related measures to mitigate climate change in Basel, Switzerland: A health-effectiveness comparison study. *Environment international*, 85, pp. 111-119.

PÉREZ-PRADA, F., MONZÓN, A. y VALDÉES, C. (2017). Managing traffic flows for cleaner cities: The role of green navigation systems. *Energies*, 10(6), p. 791.

RAGÀS PRAT, I. (2018). *Logística urbana. Manual para operadores logísticos y administraciones públicas*. 1ª edición, 2018. Marge Books.

RUTTY, M., MATTHEWS, L., ANDREY, J. y DEL MATTO, T. (2013). *Eco-driver* training within the City of Calgary's municipal fleet: Monitoring the impact. *Transportation research part D: transport and environment*, 24, pp. 44-51.

SANGUINETTI, A., KURANI, K. y DAVIES, J. (2017). The many reasons your mileage may vary: Toward a unifying typology of eco-driving behaviors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, pp. 73-84.

SCHALL, D. L., WOLF, M. y MOHNEN, A. (2016). Do effects of theoretical training and rewards for energy-efficient behavior persist over time and interact? A natural field experiment on eco-driving in a company fleet. *Energy Policy*, 97, pp. 291–300.

SIVAK, M. y SCHOETTLE, B. (2012). Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. *Transport Policy*, 22, pp. 96-99.

STILLWATER, T., KURANI, K. S. y MOKHTARIAN, P. L. (2017). The combined effects of driver attitudes and in-vehicle feedback on fuel economy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, pp. 277-288.

UNITED NATIONS, DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. (2020). *World Social Report 2020 – Inequality in a rapidly changing world*. <https://www.un.org/development/desa/publications/world-social-report-2020.html>

VELÁZQUEZ, G. y MONZÓN, A. (2018). Car-Sharing como tecnología de actualidad y de futuro en la movilidad de las ciudades. *Revista de Obras Públicas*, 3604, CICCIP, Madrid.

WANG, Y. y BOGGIO-MARZET, A. (2018). Evaluation of eco-driving training for fuel efficiency and emissions reduction according to road type. *Sustainability*, 10(11), 3891.

XIA, H., BORIBOONSOMSIN, K. y BARTH, M. (2013). Dynamic *eco-driving* for signalized arterial corridors and its indirect network-wide energy/emissions benefits. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol 17, no 1, pp. 31–41.

ZARKADOULA, M., ZOIDIS, G. y TRITPOULOU, E. (2007). Training urban bus drivers to promote smart driving: A note on a Greek eco-driving pilot program. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12.6, pp. 449-451.