



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Nicolás Peláez Ortega

05 TRABAJO FIN DE MASTER

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MASTER

MODELIZACIÓN DE FLUJOS DE TRÁFICO EN EL ENTORNO PERIURBANO DEL ARCO SUR DE LA M-40. INFLUENCIA DE LA EVOLUCIÓN DEL PARQUE EN CUANTO A AUTOMATIZACIÓN Y MOTORIZACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER
PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MÁSTER
UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
DE ORGANIZACIÓN

SEPTIEMBRE 2025

Nicolás Peláez Ortega

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER:
Felipe Jiménez Alonso



POLITÉCNICA

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor del trabajo por su dedicación e implicación a lo largo de este trabajo.

A los profesores de la ETSII que siempre estuvieron ahí para aportar conocimiento y experiencia.

A mis amigos y familiares por haberme apoyado durante todos estos años.

A todos aquellos que confiaron en mí y que me ayudaron a terminar mis estudios universitarios.

ÍNDICE

RESUMEN.....	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	9
1.1 Antecedentes.....	9
1.2 Justificación.....	10
1.3 Objetivos	12
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	13
2.1 Funcionamiento de los VAC.....	13
2.2 Niveles de Automatización.....	18
2.3 Ventajas de los VAC.....	20
2.4 La seguridad vial de los VAC.....	22
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA.....	24
CAPÍTULO 4: DEFINICIÓN DE LOS MODELOS Y SUS PARÁMETROS.....	27
4.1 Funcionamiento de los modelos.....	27
4.2 La definición de los parámetros teóricos.....	31
4.3 La definición de los parámetros en AIMSUN	34
CAPÍTULO 5: ÁREA DE ESTUDIO Y SU PARQUE MOTOR.....	40
5.1 Descripción de la Autopista M-40.....	40
5.2 Datos del tráfico en la M-40.....	47
5.3 Parque motor de vehículos	49
CAPÍTULO 6: ESCENARIOS A EVALUAR.....	56
6.1 Escenarios y replicaciones	56
6.2 Evaluación de los resultados.....	58
CAPÍTULO 7: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRÁFICO.....	60
7.1 Calibración	60
7.2 Validación del modelo	61
CAPÍTULO 8: RESULTADOS	63
8.1 Resultados por variable.....	63
8.2 Resultados de emisiones.....	68
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES E IMPACTOS.....	74
9.1 Conclusiones	74
9.2 Evaluación de impactos.....	76
CAPÍTULO 10: LÍNEAS FUTURAS	78

ÍNDICE

11. BIBLIOGRAFÍA.....	79
12. Planificación Temporal y Presupuesto.....	84
12.1 Presupuesto	84
12.2 Planificación Temporal.....	84
13. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	86
14. Abreviaturas y Acrónimos	87
15. Anexos.....	88
Anexo A Datos de demanda según Estados de Tráfico	88
Anexo B Resultados.....	97

RESUMEN

La transformación de la movilidad vial está cada vez más marcada por la irrupción de los Vehículos Automatizados y Conectados o Vehículos Autónomos y Conectados (VAC), cuya adopción progresiva promete alterar de forma profunda el comportamiento del tráfico y las dinámicas de seguridad en carretera. Este trabajo se inscribe dentro de esa revolución tecnológica, con un enfoque centrado en la evaluación del impacto que distintos niveles de automatización vehicular pueden tener sobre un tramo crítico del sistema viario español: el arco sur de la autopista M-40 de Madrid.

Desde el inicio, el objetivo no es únicamente técnico, sino estratégico. Se busca no solo anticipar los efectos del avance de la automatización y del parque motor, sino también ofrecer herramientas que ayuden a tomar decisiones más informadas en la planificación y gestión del tráfico futuro. En lugar de una visión especulativa o futurista, el enfoque combina rigor metodológico, modelado realista y simulación detallada. Esto permite aproximarse con solidez a una pregunta central: ¿cómo evolucionará la seguridad vial, el flujo vehicular y las emisiones contaminantes cuando se incorporen de forma progresiva los VAC en la red interurbana?

El análisis arranca con una revisión del estado del arte que revela la aceleración en el desarrollo de tecnologías de automatización —especialmente a partir de 2010— y su potencial para reducir accidentes y mejorar la eficiencia. Sin embargo, la literatura también muestra que estos beneficios no se alcanzan de forma automática ni inmediata: dependen del nivel de penetración tecnológica, de la interacción entre vehículos convencionales y automatizados, y del diseño de las infraestructuras. Además, existen lagunas importantes en torno a los efectos intermedios, es decir, qué ocurre durante la convivencia entre distintos niveles de automatización, un aspecto clave para la planificación a medio plazo.

Con base en esa revisión, se diseña un marco metodológico que apuesta por la microsimulación con el software Aimsun, considerado idóneo por su capacidad para modelar el comportamiento individual de cada vehículo. Este modelo se nutre de dos componentes principales: parámetros técnicos calibrados (tiempos de reacción, distancia de seguridad, aceleración, agresividad, etc.) y una red vial construida a partir de datos reales del tramo de estudio. La elección de este segmento de la M-40 responde a múltiples factores: elevada intensidad de tráfico, presencia de más de 20 salidas y entradas en solo 17 km, alta siniestralidad, y proximidad a zonas de elevada densidad urbana y logística.

El modelo generado replica fielmente la configuración del entorno, incluyendo carriles principales, vías de servicio, enlaces, limitaciones de velocidad y dispositivos de aforo. Para asegurar la precisión del modelo, se calibra mediante comparación con datos procedentes de detectores reales, colocados en la misma autopista.

Una vez validado el modelo base, se construye el núcleo del trabajo: una batería de escenarios prospectivos que representan distintas combinaciones posibles del parque motor entre los años 2025 y 2075, además de las ya conocidas entre 2000 y 2025. En total se definen 8 escenarios, que

RESUMEN

reflejan la transición desde un parque 100% convencional hasta una flota compuesta únicamente por vehículos totalmente automatizados. Cada escenario incorpora distintas proporciones de vehículos por nivel de automatización (del 0 al 5), tipo de combustible (diésel, gasolina, GLP, eléctricos) y uso de tecnologías como ACC (Control de Crucero Adaptativo) y CACC (Control de Crucero Adaptativo Conectado). También se tienen en cuenta variables como la segmentación entre turismos y vehículos pesados, así como su distribución temporal en franjas punta y valle.

La lógica de diseño de escenarios no es arbitraria. Parte de una proyección del parque motor actual y sus posibles tasas de renovación, aplicando una lógica de transición tecnológica realista. De hecho, se estima que la penetración de vehículos de nivel 3 comenzará a generalizarse hacia 2040, mientras que los niveles 4 y 5 podrían alcanzar cuotas significativas hacia mediados del siglo.

Todo ello permite simular con fidelidad cómo podría comportarse la infraestructura ante diferentes grados de automatización. No se trata simplemente de comparar dos extremos (presente y futuro), sino de entender los efectos de transición: qué mejoras son progresivas, cuáles son exponenciales, y qué riesgos aparecen en entornos mixtos donde conviven vehículos convencionales y automatizados. Esta perspectiva de transición es clave, ya que en las próximas décadas será precisamente ese entorno mixto el dominante en la mayoría de las vías.

Además, uno de los aportes más relevantes es la integración de variables de seguridad vial y emisiones dentro del modelo de tráfico. Esto implica no solo medir flujos y velocidades, sino también identificar puntos de conflicto, calcular métricas de riesgo (como el tiempo hasta colisión o la deceleración requerida) y estimar emisiones contaminantes con un alto grado de precisión. La inclusión de estos indicadores permitirá en fases posteriores evaluar de forma cuantitativa el impacto de cada escenario en términos de siniestralidad y sostenibilidad ambiental.

Palabras clave: movilidad interurbana, tráfico, transporte, tránsito, vías interurbanas, vehículo autónomo

Códigos UNESCO:

- 3317.10 Ingeniería del Tráfico
- 3327.02 Análisis del Tráfico
- 3327.03 Sistemas de Tránsito Urbano

ABSTRACT

The transformation of road mobility is increasingly marked by the emergence of Automated and Connected Vehicles (CAV) whose progressive adoption promises to profoundly alter traffic behaviour and road safety dynamics. This work is part of that technological revolution, with a focus on assessing the impact that different levels of vehicle automation may have on a critical section of the Spanish road system: the southern arc of the M-40 motorway in Madrid.

From the outset, the objective is not only technical but also strategic. The aim is not only to anticipate the effects of advances in automation but also to provide tools to help make more informed decisions in the planning and management of future traffic. Rather than a speculative or futuristic vision, the approach combines methodological rigour, realistic modelling and detailed simulation. This allows for a solid approach to a central question: how will road safety, traffic flow and pollutant emissions evolve when CAVs are progressively incorporated into the interurban network?

The analysis begins with a review of the state of the art, which reveals the acceleration in the development of automation technologies —especially since 2010— and their potential to reduce accidents and improve efficiency. However, the literature also shows that these benefits are not achieved automatically or immediately: they depend on the level of technological penetration, the interaction between conventional and automated vehicles, and the design of infrastructure. In addition, there are significant gaps in our understanding of intermediate effects, i.e., what happens when different levels of automation coexist, a key aspect for medium-term planning.

Based on this review, a methodological framework has been designed that uses microsimulation with AIMSUN software, considered ideal for its ability to model the individual behaviour of each vehicle. This model is based on two main components: calibrated technical parameters (reaction times, safety distance, acceleration, aggressiveness, etc.) and a road network constructed from real data from the study section. The choice of this segment of the M-40 responds to multiple factors: high traffic intensity, the presence of more than 20 exits and entrances in just 17 km, high accident rates, and proximity to areas of high urban and logistical density.

The model generated faithfully replicates the configuration of the environment, including main lanes, service roads, junctions, speed limits and gauging devices. To ensure the accuracy of the model, it is calibrated by comparison with data from real detectors placed on the same motorway.

Once the base model has been validated, the core of the work is constructed: a battery of prospective scenarios representing different possible combinations of vehicle fleets between 2025 and 2075. A total of 8 scenarios is defined, reflecting the transition from a 100% conventional fleet to a fleet composed solely of fully automated vehicles. Each scenario incorporates different proportions of vehicles by level of automation (from 0 to 5), fuel type (diesel, petrol, LPG, electric) and use of technologies such as ACC (Adaptive Cruise Control) and CACC (Connected). Variables such as the segmentation between passenger cars and heavy vehicles, as well as their temporal distribution in peak and off-peak periods, are also taken into account.

RESUMEN

The logic behind the design of the scenarios is not arbitrary. It is based on a projection of the current vehicle fleet and its possible renewal rates, applying a realistic technological transition logic. In fact, it is estimated that the penetration of level 3 vehicles will begin to become widespread around 2040, while levels 4 and 5 could reach significant shares by the middle of the century.

This entire methodological framework makes it possible to accurately simulate how the infrastructure might behave under different degrees of automation. It is not simply a matter of comparing two extremes (present and future), but of understanding the effects of transition: which improvements are progressive, which are exponential, and what risks arise in mixed environments where conventional and automated vehicles coexist. This transition perspective is key, as it is precisely this mixed environment that will dominate most roads in the coming decades.

In addition, one of the most relevant contributions is the integration of road safety and emissions variables into the traffic model. This involves not only measuring flows and speeds, but also identifying conflict points, calculating risk metrics (such as time to collision or required deceleration) and estimating pollutant emissions with a high degree of precision. The inclusion of these indicators will enable the impact of each scenario in terms of accident rates and environmental sustainability to be quantitatively assessed in later phases.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El **Vehículo Automatizado y Conectado (VAC)**¹ es una tecnología transformadora que tiene un gran potencial para cambiar nuestra vida cotidiana y nuestros modos de transporte [1]. Se podría decir que es la cumbre en desarrollo de la integración entre inteligencia artificial (IA), robótica, diseño de automóviles y tecnologías de la información [2]. Se han llegado a crear vehículos autónomos que pueden conducirse solos, los cuales pueden circular por las carreteras existentes en una gran variedad de contextos ambientales.

Los VACs tienen el gran potencial de evitar colisiones mortales, proporcionar movilidad a las personas mayores y discapacitadas, aumentar la capacidad de las carreteras, ahorrar combustible y reducir las emisiones. Esto se debe a que no cometen errores humanos ni infringen intencionadamente las normas de tráfico, de modo que superan al conductor humano y aumentan la seguridad en carretera [3].

Durante los últimos años, múltiples estudios sugieren que el impacto de la conducción automatizada en lo que se refiere a seguridad vial es ciertamente desconocido. Por ejemplo, un aumento de la comodidad de la conducción hará que los conductores presten menos atención a la carretera, provocando el aumento de accidentes. Sin embargo, otros estudios más optimistas [4] sugieren que los VAC en el máximo nivel de automatización reduzcan en hasta un 94% los accidentes de tráfico causados por el conductor del vehículo [5].

El mercado actual de vehículos ofrece sistemas de asistencia al conductor como el ADAS (Sistemas avanzados de ayuda a la conducción) que incluye el control de crucero adaptativo, adaptación de la velocidad, reconocimiento de señales de tráfico, advertencia de abandono de carril y de colisión, así como la detección de objetos y peatones potencialmente combinados con el frenado automático de emergencia. Este sistema permitiría a un vehículo entrar en los primeros niveles de la automatización (**vehículo automatizado**).

En cuanto a un **vehículo conectado**, sería necesario que esté equipado con tecnologías de transmisión de datos que ayudan a tomar decisiones relacionadas con la conducción. Estas pueden ser un sistema GPS para seguir una ruta, sensores que procesan y analizan los datos transmitidos al vehículo y una conexión inalámbrica para permitir la comunicación con otros vehículos (V2V), infraestructuras (V2I) o con cualquier elemento de la red de carreteras (V2X). En consecuencia, la conexión inalámbrica podría ser de corto alcance de transición (tecnología Wi-Fi) o de largo alcance de transición (Long Term Evolution, LTE) 4G o 5G [6, p. 10].

Las tecnologías de conexión y los dispositivos autónomos no son necesariamente dependientes entre sí. Sin embargo, la integración de estas tecnologías en los vehículos permite una movilidad más segura, rápida y eficiente. Esto se consigue dotando a los vehículos motorizados de la

¹ También puede definirse como Vehículo Autónomo Conectado

capacidad de «conocer» el estado de la red de carreteras, cambiar de ruta en función de la información disponible (como el cierre de un carril) y alertar a los vehículos que circulan por detrás de incidentes como la necesidad de evitar un peligro.

1.2 Justificación

1.2.1 *Sobre la investigación realizada*

La introducción progresiva de los Vehículos Autónomos y Conectados (VAC) constituye uno de los retos tecnológicos más disruptivos del sector del transporte en las próximas décadas. En este contexto de transición tecnológica, resulta indispensable disponer de estudios rigurosos que permitan evaluar el verdadero impacto de estos vehículos en las infraestructuras existentes, así como en el entorno urbano e interurbano.

Esta investigación surge ante la necesidad de anticipar los efectos de la automatización del tráfico sobre la seguridad vial, la eficiencia del flujo vehicular y las emisiones contaminantes. La falta de datos reales y el desconocimiento del comportamiento dinámico de flotas mixtas (vehículos automatizados y no automatizados) genera incertidumbre entre los responsables de planificación, los legisladores y las autoridades de tráfico.

Así, este estudio pretende contribuir a la toma de decisiones basadas en evidencia científica, determinando en qué medida debe fomentarse la adopción de los VAC, bajo qué condiciones, y con qué tipo de acompañamiento normativo y técnico. Mediante simulaciones avanzadas, es posible establecer escenarios realistas que permitan valorar el potencial de esta tecnología para mejorar la movilidad y reducir el impacto medioambiental, dos de los grandes desafíos a los que se enfrenta la movilidad del siglo XXI.

Además, se analiza cómo varían los beneficios en función del nivel de penetración y automatización de los VAC, permitiendo a los gestores de tráfico anticipar fases de transición crítica y diseñar políticas de incentivo, regulación o adaptación de infraestructuras. Este trabajo se posiciona, por tanto, como una herramienta de planificación estratégica en el camino hacia una movilidad más segura, eficiente y sostenible.

1.2.2 *Sobre la microsimulación en Aimsun*

Como consecuencia del probable periodo de transición en el que los vehículos totalmente automatizados, parcialmente automatizados y sin automatizar compartirán nuestras carreteras, esta investigación intenta comprender el impacto de la entrada gradual de los vehículos totalmente automatizados en la seguridad del tráfico modelando el comportamiento de cada nivel de automatización mediante un programa de microsimulación de tráfico. La microsimulación se ha utilizado sobre todo para resolver problemas de tráfico real. Proporciona un método avanzado de análisis, verificación y calibración. Además, la simulación y la modelización proporcionan una comprensión inherente al ofrecer una visión clara de los sistemas complejos.

La modelización propuesta se asignará a cada tipo de vehículo en diferentes escenarios en un modelo de autopista calibrado, siguiendo las directrices propuestas en [6]. El estudio proporcionará resultados ciertamente razonables debido a la cuidadosa modelización de los parámetros y a la aplicación de una amplia gama de combinaciones de flotas que podrían darse en el mundo real. Además, explorará los parámetros de conducción que ejercen una influencia significativa en la seguridad del tráfico, durante la conversión a la conducción autónoma.

En lo que respecta al **programa de simulación**, la elección recayó en **Aimsun Next**, un software de microsimulación ampliamente validado en el ámbito académico y profesional. Aimsun ofrece la posibilidad de modelar el comportamiento individual de cada vehículo en la red, lo que permite analizar de forma detallada las interacciones entre vehículos convencionales y vehículos automatizados. Su flexibilidad para parametrizar distintas tecnologías de asistencia a la conducción (ACC, CACC, diferentes niveles de automatización) lo convierte en una herramienta idónea para evaluar escenarios futuros de transición tecnológica. Además, dispone de módulos integrados para el cálculo de emisiones contaminantes y el análisis de seguridad vial mediante indicadores de riesgo, lo que permite un enfoque integral alineado con los objetivos del presente trabajo. Entre las alternativas consideradas se encuentran otros programas como VISSIM o SUMO; sin embargo, se descartaron principalmente por limitaciones en el tratamiento simultáneo de emisiones, seguridad y automatización avanzada, aspectos centrales en este estudio.

Por último y, como adición a la investigación realizada en [6], se visualizará el parque móvil actual de vehículos y se realizará una estimación del futuro. De este modo, se podrá realizar una medición de las emisiones de los distintos vehículos mucho más realista, ya que al dejar los parámetros predeterminados de Aimsun, se estaría presuponiendo que el parque motor en todo momento y en cualquier escenario, funciona con un porcentaje fijo de vehículos con motor diésel, eléctricos, Gas de Petróleo Licuado (LPG) y gasolina. No obstante, se realizará un análisis adicional con un porcentaje fijo de vehículos de diferentes motores para visualizar la reducción de emisiones imputable a la automatización.

1.2.3 Sobre la autopista elegida: Arco Sur de la M-40

El tramo seleccionado para la presente investigación comprende desde los puntos kilométricos 15,4 hasta el 32,9, de la autopista de circunvalación M-40 desde el enlace con la autovía A-3 hasta el enlace con la autovía A-5 respectivamente.

La razón por la que se ha elegido dicho tramo radica en la elevada densidad de tráfico al servir como enlace a autovías importantes tales como la A-3, A-4, A-42 y A-5, superando en numerosos tramos los 150.000 vehículos/día. Es por ello por lo que, tanto la M-40 como las autovías con las que enlaza, actúan como las principales arterias para Madrid y su área metropolitana. Asimismo, esta autovía también es utilizada por vehículos que no tienen ni origen ni destino en Madrid, por lo que su importancia también alcanza el nivel nacional. Además, el arco sur conecta áreas logísticas e industriales con el centro de la capital, por lo que soporta un tráfico mixto de turismos y vehículos pesados, y así modelizar de forma más completa la diversidad del parque motor.

Otra de las razones de su estudio es por la considerable cantidad de salidas (20) en tan solo 14,2 km de autovía, haciendo atractivo el estudio de la simulación de los vehículos VAC para valorar la reducción de la siniestralidad. **Solo en 2023, se han registrado un total de 242 accidentes de tráfico en toda la M-40**, convirtiéndose en la autovía con más siniestros en toda la Comunidad de Madrid [7].

La elección de este tramo también tiene una motivación práctica: existen **datos de tráfico disponibles** a través de aforadores y estaciones de medida oficiales, lo que facilita la calibración y validación del modelo. Esta disponibilidad de información es un requisito indispensable para dotar de realismo y credibilidad a los resultados de la simulación.

1.3 Objetivos

El propósito principal de este Trabajo Fin de Máster es **analizar el impacto de la incorporación progresiva de los Vehículos Automatizados y Conectados (VAC) en la seguridad vial, la eficiencia del tráfico y las emisiones contaminantes**, utilizando la modelización del tráfico como herramienta de evaluación. En este sentido, la microsimulación examinará de manera rigurosa cómo los distintos niveles de automatización pueden modificar el comportamiento del tráfico en un tramo representativo de la red interurbana.

A partir de este objetivo general, se definen una serie de objetivos específicos que permiten abordar el fenómeno de manera integral y estructurada:

- **Caracterizar la composición y evolución del parque motor**, tanto a nivel nacional como en el área de influencia de la M-40, con el fin de contextualizar el escenario actual y proyectar su transformación hacia una flota con mayor presencia de vehículos automatizados y electrificados.
- **Evaluar las implicaciones en materia de seguridad vial**, mediante la identificación y cuantificación de los conflictos simulados en función del grado de penetración de los VA, así como la variación en la severidad de los mismos.
- **Analizar la eficiencia del tráfico**, considerando indicadores como la velocidad media, la capacidad de la vía o la fluidez de los flujos vehiculares en escenarios con diferentes proporciones de vehículos automatizados.
- **Estudiar las emisiones contaminantes** asociadas a los distintos escenarios de simulación, integrando tanto la tipología del parque motorizado como los cambios derivados de los patrones de conducción automatizada.

De esta manera, dichos objetivos persiguen aportar un marco analítico sólido que permita valorar, desde una perspectiva técnica y científica, los efectos de la automatización vehicular sobre la movilidad y la sostenibilidad del sistema viario, ofreciendo evidencias útiles para la planificación y la toma de decisiones en el ámbito de la ingeniería del tráfico.

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1 Funcionamiento de los VAC

2.1.1 Comportamiento teórico

Los operadores de transporte se preparan para afrontar el reto de los VAC en los próximos años. Por ello, se están probando prototipos de VAC en numerosas grandes ciudades de todo el mundo. Dado que la planificación y la gestión de la movilidad actual y futura requieren comprender las interacciones entre las flotas de VAC y los vehículos convencionales, la modelización del transporte entró en escena para simular todas las ideas sobre el comportamiento de los VAC y los retos a los que se enfrentan en relación con sus interacciones.

Los principales comportamientos serían los siguientes [8]:

- **Conducción libre**, donde el vehículo sólo responde a la infraestructura. Permitirá un control perfecto del acelerador, sin oscilaciones, en torno a una velocidad deseada.
- **Seguimiento de vehículos**, cómo sigue a otros vehículos del mismo carril. Permitirá que los vehículos VAC circulen con menor distancia entre sí, con mayor seguridad e incluso mayor velocidad que la actual.

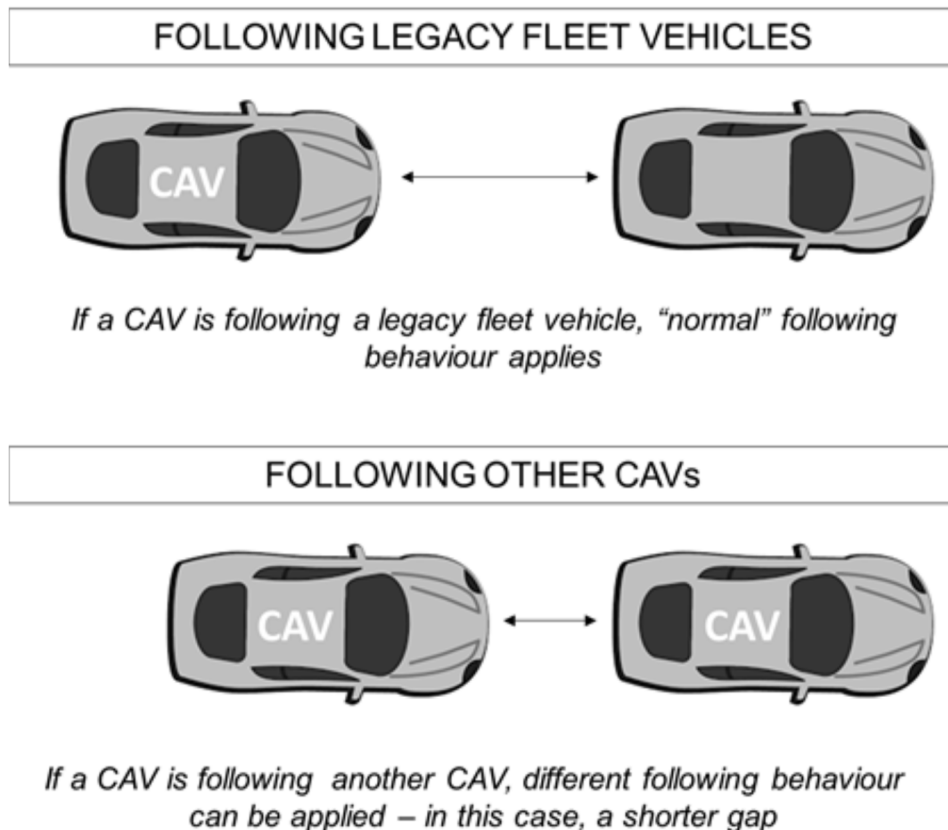


Figura 1: Ejemplo de la reducción de distancias entre vehículos VAC [8].

- **Cambio de carril**, sea cual sea la situación. Los vehículos pueden “aceptar” huecos más pequeños en el tráfico y maniobrar con seguridad entre las corrientes de tráfico a mayor velocidad.
- **Salida y entrada de los distintos flujos de tráfico**. Los vehículos cooperan para permitir la confluencia fluida de aquellas zonas con tráfico denso o muy denso, a mayor velocidad y con espacios más reducidos.
- **Planificación y toma de decisiones**: El vehículo debe reaccionar ante el comportamiento de otros vehículos, otros usuarios de la carretera o las infraestructuras. Un mejor suministro de datos y comunicación entre entidades permite tomar decisiones más eficaces.

Sin embargo, existe una gran incertidumbre sobre si estos beneficios se materializarán y, en caso afirmativo, sobre la magnitud de los mismos. Los VAC podrían proporcionar la tecnología necesaria para ello, sustituyendo al falible conductor humano por un control de precisión. A la hora de evaluar los beneficios potenciales, hay que tener en cuenta una serie de ventajas y desventajas:

- Es poco probable que el ajuste óptimo para cada una de las características ‘Confort-Seguridad-Capacidad’ esté alineado. Aunque puede ser técnicamente factible que un vehículo circule a una velocidad de sólo unos metros del vehículo que le precede, esto puede no ser aceptable según los deseos de comodidad del usuario. Además, es probable que la seguridad sea una limitación primordial en cualquier entorno regulado.
- Los fabricantes de automóviles no son responsables del funcionamiento seguro, eficaz y fiable de la red de carreteras. Dentro de los límites de la regulación, serán estos fabricantes de equipos originales, y en última instancia el mercado al que sirven, los que determinen las capacidades de los VAC.

2.1.2 Tecnologías emergentes presentes en los vehículos autónomos

Algunos ejemplos que destacan en las tecnologías emergentes que **influyen en la separación longitudinal de los vehículos, así como en el comportamiento en las intersecciones** son [8]:

- **Control de crucero adaptativo (ACC)**, en el que el vehículo ajusta automáticamente la separación (definida en el tiempo y/o el espacio) con el vehículo que le precede, utilizando datos de sensores pasivos para ajustar la velocidad.
- **Control de crucero adaptativo conectado (CACC)**, en el que el vehículo también puede recibir datos de vehículos situados más adelante en el flujo de tráfico y actuar en consecuencia. Además, se comporta con una aceleración y deceleración más controladas y menos agresivas al cambiar de carril.

En ambos casos, el conductor conserva el control sobre el movimiento lateral del vehículo en términos de elección de carril. Además de permitir una menor separación entre vehículos, se ha informado de que el ACC y el CACC podrían mejorar la capacidad al incidir en la «estabilidad de la cadena», reduciendo los errores y las diferencias en las velocidades de deceleración entre vehículos que provocan «ondas de choque».

Múltiples estudios calcularon un aumento aproximado del 43% de la capacidad con un flujo de tráfico con todos sus vehículos equipados con ACC [9]. Del mismo modo, se llegó a constatar que la capacidad de los carriles podría llegar a duplicarse en un escenario con espacios cortos entre vehículos y un comportamiento agresivo de aceleración y deceleración [10]. Sería necesario que una proporción elevada (>75%) de la flota esté equipada con tecnología que permite un mejor seguimiento para que los beneficios sean notables.

En resumen, los puntos a considerar son la separación temporal entre vehículos, la frecuencia con la que se debe variar la aceleración y la cantidad de vehículos equipados con las tecnologías mencionadas. Ninguna de estas cantidades se conoce bien en la actualidad. Los intervalos de tiempo adoptados en los estudios realizados hasta la fecha oscilan entre 0,5 y 2 segundos, aproximadamente, más que un conductor humano típico. Cualquier intento de cuantificar el flujo de tráfico y los impactos en la capacidad de los vehículos con un comportamiento longitudinal modificado debe, por lo tanto, considerar una serie de escenarios diferentes.

Por el contrario, otros estudios [11] han sugerido que las tecnologías de ayuda a la conducción en autopistas o autovías (como el ACC) pueden afectar a la capacidad en situaciones de incorporación o abandono de carril, creando un cuello de botella. Esto pone de manifiesto un punto claro: es probable que exista una compensación en la que las tecnologías diseñadas para ayudar al conductor y mejorar la experiencia de conducción en una situación determinada puedan afectar negativamente a las operaciones en otra situación.

2.1.3 Conectividad

Un grupo de vehículos conectados y próximos entre sí constituye la red efímera conocida como VANet. Las comunicaciones se denominan genéricamente V2V para las comunicaciones de vehículo a vehículo, V2I para las comunicaciones de vehículo a infraestructura o, cuando ambas funcionan juntas, comunicaciones V2X. Dado que se espera que V2I cubra las redes en un largo futuro y este trabajo pretende capturar la realidad más reciente, sólo se tiene en cuenta la conectividad V2V. Esta red V2V se compone de:

1. Unidad de a bordo (OBU) equipada en el VAC, que representa el receptor y el transmisor en el vehículo;
2. Canales, que simulan el hardware de radio y los protocolos que proporcionan comunicación entre vehículos;
3. Mensajes de Conciencia Cooperativa, que proporcionan información sobre la presencia, actividad y posición del VAC; y
4. el Centro de Gestión del Tráfico (TMC), que une los protocolos anteriores, y controla todo el proceso de conectividad.

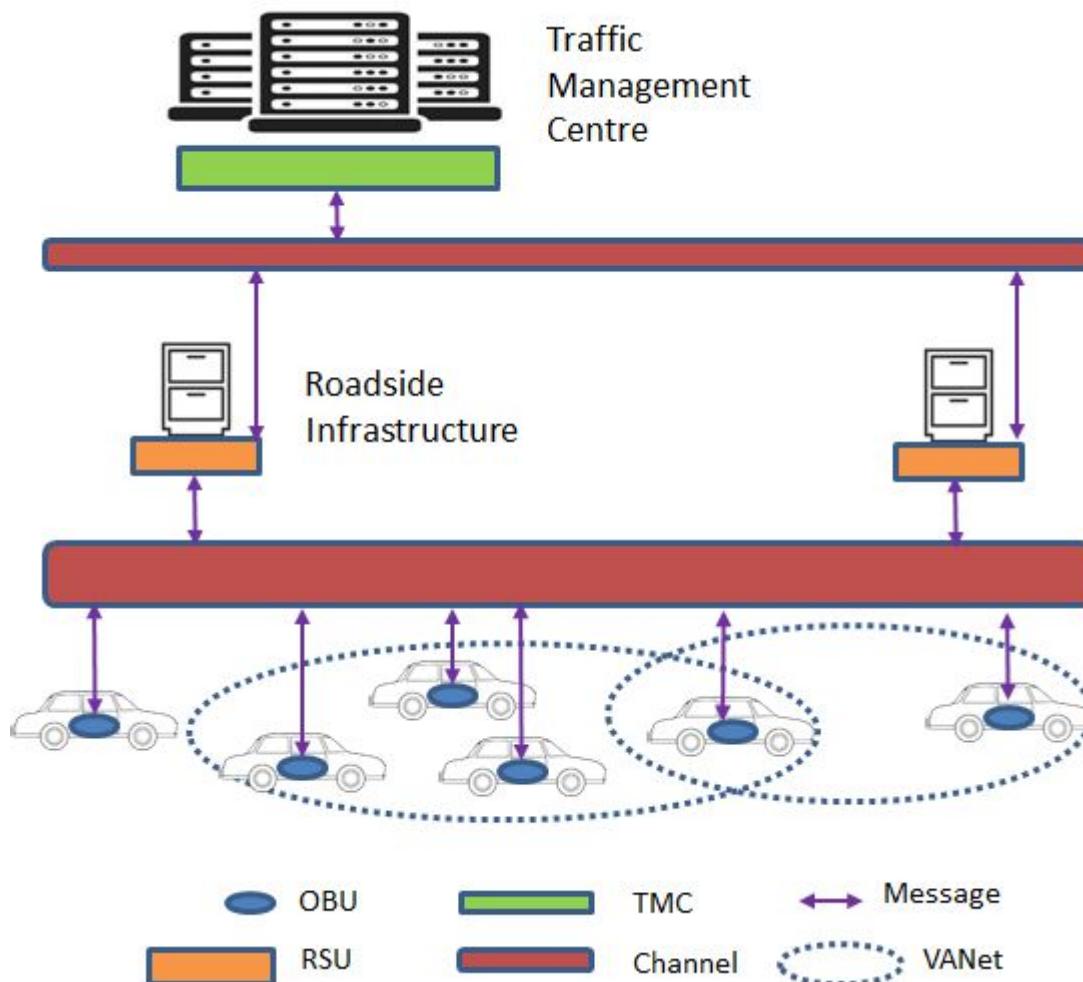


Figura 2: Esquema de la red V2X [12]. En el caso de la conectividad V2V, los vehículos conectan directamente con el TMC, mientras que en el V2I los vehículos solo conectan con la infraestructura de la carretera

Los vehículos utilizan un canal de comunicación conectado a su OBU para comunicar datos sobre un conjunto específico de mensajes dentro de un espacio definido. El TMC, que se dedica a la gestión de la comunicación, recibe mensajes del canal de comunicación orientado a los vehículos en su área local. Los vehículos equipados en la red de tráfico son informados de las decisiones del TMC a través de señales de canal después de que el TMC haya evaluado la información. El «Motor de Reglas del Vehículo» añade los datos V2X de otros vehículos a la comprensión ya existente del vehículo sobre el tráfico en el espacio. Esto influirá en el comportamiento del vehículo y en la toma de decisiones en términos de cambio de su espacio longitudinal y lateral, velocidad, aceleración, desaceleración y proceso de cambio de carril, entre otros.

Los canales son una especie de protocolo de comunicación que se utiliza para transmitir datos entre vehículos, por lo que su importancia en este proceso es evidente. Los canales suelen funcionar utilizando un canal de transmisión de largo alcance basado en células LTE o un canal de tecnología Wi-Fi de corto alcance, como IEEE 802.11p [13]. Un miembro de la red, como un vehículo en una VANet, debe adherirse a determinados protocolos para cada tipo de canal que se ocupan de entrar y salir de una red de datos, así como de gestionar la congestión del canal.

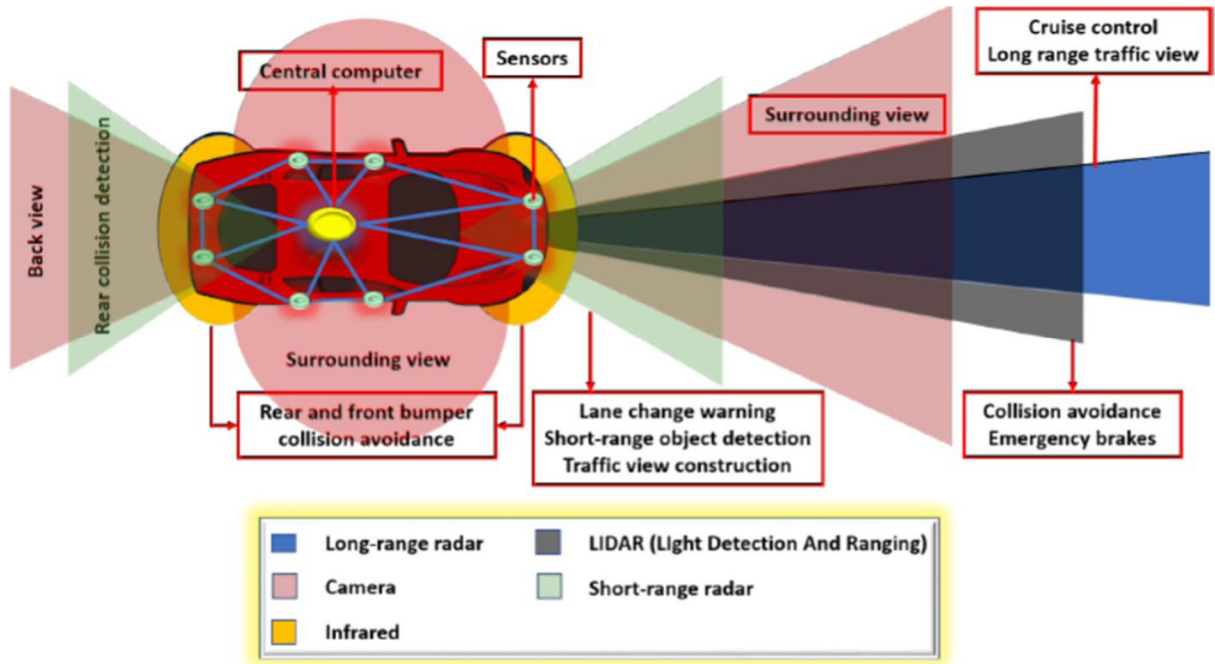


Figura 3: Arquitectura básica de un vehículo autónomo. Incluyen Sensores, Percepción y Localización, Planificación y Control, y Comunicación con la Nube [14]

2.1.4 Tecnologías a investigar

Se considera prioritaria la investigación en los siguientes campos. Algunos ofrecen oportunidades particulares para el análisis cuantitativo a través de la modelización del tráfico:

2.1.4.1 Preferencia del usuario

Multitud de investigaciones han demostrado el potencial de los VAC para influir en la capacidad de enlaces y cruces a través de diversos mecanismos. Dado el estado formativo de la industria de los VAC, los trabajos realizados anteriormente han tendido a basarse en una serie de suposiciones en torno, por ejemplo, al desfase temporal y la tasa de aceleración. Los futuros plausibles sobre lo que puede ser capaz de hacer un vehículo conectado o autónomo no se traducen necesariamente en los deseos del usuario. Por lo tanto, es importante tener en cuenta la heterogeneidad de la elección del usuario en la flota de vehículos.

2.1.4.2 Heterogeneidad del parque de vehículos

No está lo suficientemente investigada la transición de la flota de vehículos existente a una totalmente autónoma. Esto debe tener en cuenta los elementos de preferencia de los usuarios y las compensaciones entre capacidad y comodidad que se han comentado anteriormente, así como las diferentes clases de usuarios: turismos, vehículos pesados y vehículos de transporte público.

2.1.4.3 El entorno operativo

Gran parte de la incertidumbre en torno al comportamiento de los vehículos conectados y autónomos se refiere a situaciones particulares. Se requieren múltiples investigaciones específicas para los posibles comportamientos en rotondas, incorporaciones a autopistas y cualquier otra

clase de intersección, señalizada o no. Esto se debe a que el comportamiento en cada caso es totalmente distinto el uno del otro.

2.2 Niveles de Automatización

La SAE [15] (Society of Automotive Engineers) clasifica la automatización en 6 niveles, desde el 0 (completamente manual) hasta el nivel 5 (totalmente automatizado) siguiendo los criterios:

	SAE NIVEL 0	SAE NIVEL 1	SAE NIVEL 2	SAE NIVEL 3	SAE NIVEL 4	SAE NIVEL 5
Qué debe hacer el conductor	Conducir siempre que estas funciones de asistencia al conductor estén activadas, incluso si sus pies están fuera de los pedales y no esté conduciendo			No está conduciendo cuando estas funciones de conducción automatizada están activadas, aunque esté sentado en el asiento del conductor.		
	Supervisar constantemente estos elementos de apoyo; debe dirigir, frenar o acelerar según sea necesario para mantener la seguridad			Puede requerir la conducción manual	Estas funciones de conducción automatizada no requerirán hacerse cargo de la conducción	

	Funciones de apoyo al conductor			Funciones de Conducción Automatizada		
Utilidades	Estas funciones se limitan a proporcionar avisos y asistencia momentánea	Estas funciones proporcionan al conductor asistencia en la dirección O en el frenado/ aceleración.	Estas funciones proporcionan al conductor asistencia en la dirección Y en el frenado/ aceleración.	Estas funciones pueden conducir el vehículo en condiciones limitadas y no funcionarán a menos que se cumplan todas las condiciones requeridas		Esta función puede conducir el vehículo en todas las condiciones
Ejemplos	Frenado automático de emergencia, aviso de ángulo muerto, aviso de salida de carril	Centrado de carril O control de cruceo adaptativo	Centrado de carril Y control de cruceo adaptativo al mismo tiempo	Conducción automatizada en condiciones de tráfico muy denso y/o retenciones	Taxi local sin conductor, se pueden instalar o no pedales/ volante de dirección	Además del nivel 4, puede conducir en todas partes y condiciones

Tabla 1: Adaptación al español de la SAE J3016TM Levels of driving automationTM [15]



Figura 4: Infografía de la Dirección General de Tráfico (DGT) de los distintos niveles de automatización según la SAE [16]

Para la presente investigación, los 6 niveles se adaptarán en función de solo 3 criterios:

- Dirección, aceleración y deceleración
- Control del entorno
- Conducción completa

Dichos criterios quedarán reflejados en la siguiente tabla, indicando si es necesaria la intervención humana (MANUAL: M) o si no es necesaria (AUTOMÁTICO: A):

NIVEL (según SAE)	Denominación	Dirección, aceleración y deceleración	Control del entorno	Conducción completa
0	Totalmente Manual	M	M	M
1	Asistencia al conductor	M	M	M
2	Automatización parcial	A	M	M
3	Automatización condicional	A	A	M
4	Automatización elevada	A	A	A
5	Totalmente Automático	A	A	A

Tabla 2: Niveles de automatización adaptada según los criterios definidos por [17]

Dadas las escasas diferencias entre el nivel 4 y 5, se trabajará con los mismos valores y condiciones para ambos niveles.

En general, un vehículo equipado con un sistema de asistencia al conductor se define como vehículo de nivel 1, con cambios modestos en su comportamiento con respecto al nivel 0, que se reflejan en una mejor aceptación del límite de velocidad y una mayor aceptación de la guía del líder.

Los vehículos de nivel 3 muestran tiempos de reacción más bajos y una conducción más cuidadosa, lo que refleja mayores avances autónomos al cambiar de carril y al seguir a otros coches. Por último, los vehículos de niveles 4 y 5 representan vehículos totalmente autónomos con un alto grado de regulación tanto en sentido longitudinal como lateral, un tiempo de reacción muy corto y un bajo nivel de agresividad.

2.3 Ventajas de los VAC

A continuación, se resumen las ventajas vistas hasta ahora sobre los VAC en comparación a aquellos vehículos con nivel de automatización de entre 0 y 1:

1. Sus tiempos de reacción serán más rápidos y podrían optimizarse para mejorar el ahorro de combustible, suavizar el flujo de tráfico y reducir las emisiones.
2. Podrían transportar tanto mercancías como pasajeros sin necesidad de permiso de conducción a sus destinos.
3. Los VAC podrían programarse para obedecer las leyes de tráfico. No dependerán de los fallos humanos ni de que el mismo conductor esté incapacitado para la conducción. Por lo tanto, aumentaría significativamente la seguridad vial.

2.3.1 Reducción de consumo, emisiones y del tráfico

Numerosas investigaciones han analizado la posibilidad de que los vehículos eléctricos compactos reduzcan la congestión en diversos contextos [1]. Al intentar reducir las aceleraciones y los frenazos en el tráfico de las autopistas, los distintos niveles de adopción de los vehículos eléctricos podrían suavizar el flujo del tráfico. Dependiendo de la comunicación V2V y de cómo se apliquen los algoritmos de suavización del tráfico, esto podría mejorar el ahorro de combustible y la velocidad de los vehículos congestionados en el flujo de viajes por autopista entre un 23% y un 39% y entre un 8% y un 13%, respectivamente [18].

Ciertos estudios calcularon que una reducción del 20% en las aceleraciones y deceleraciones podría dar lugar a una reducción del 5% en el consumo de combustible y las emisiones relacionadas [19]. La elección inteligente de aparcamiento por parte de los VAC podría dar lugar a un mayor ahorro de combustible y evitar los cruceros para aparcar. Por ejemplo, las tecnologías a bordo de los

vehículos podrían interactuar con la infraestructura de aparcamiento para permitir dejar y recoger pasajeros sin conductor [20].

Además, se abordó el hecho de que el efecto de los VAC en la reducción de la congestión del tráfico podría tener el **potencial de alterar significativamente el comportamiento de viaje**. Por ejemplo, se observó que los conductores de edad avanzada se esforzaban por gestionar las dificultades de conducción evitando las carreteras congestionadas, las rutas desconocidas, la conducción nocturna y el mal tiempo; mientras que otros renunciaban por completo a conducir [21]. Los VAC podrían promover la movilidad de la independencia individual al tiempo que superarían varios tipos de dificultades de conducción de diferentes pasajeros (ancianos, menores y discapacitados), lo que también podría repercutir en el crecimiento de la demanda de viajes [1].

2.3.2 Transporte de Mercancías

El sector del transporte por carretera podría utilizar la misma tecnología que se aplica a los coches autónomos para mejorar la eficiencia del combustible y reducir la necesidad de conductores de camiones incluso para los viajes de larga distancia. Sin embargo, los trabajadores deberían seguir necesitando cargar y descargar mercancías. Aparte de la mejora de los tiempos de viaje en redes de mayor capacidad, la reducción de la distancia entre camiones también puede suponer un mayor ahorro de combustible debido a la reducción de la resistencia al aire y a la posibilidad de frenado adaptativo [20].

Por el contrario, se ha comprobado que las distancias reducidas entre vehículos dificultan la salida o entrada de otros conductores en las autopistas, lo que estimula la construcción de infraestructuras nuevas o mejoradas con carriles reservados para los grupos de vehículos que circulan unos junto a otros en el mismo carril (en inglés, *platoon lanes*) y pavimentos más gruesos para soportar el tráfico de camiones pesados [1].

2.3.3 Influencia en la Seguridad Vial

Se considera que más del 90% de los accidentes están causados principalmente por errores del conductor [22]. Además, el alcohol, la distracción, el consumo de drogas y/o el agotamiento son factores concurrentes en más del 40% de los accidentes mortales. Con frecuencia se identifica que otras variables humanas, como la falta de atención, la distracción o el exceso de velocidad, han contribuido a la probabilidad de colisión y/o a la gravedad de las lesiones, incluso cuando la causa principal de una colisión se atribuye al vehículo, la infraestructura o el entorno. Por lo tanto, los VAC podrían ser inmunes a los errores humanos, lo que podría dar lugar a una reducción de las colisiones potenciales totales de más del 90% y de la tasa de colisiones mortales de al menos el 40%.

2.4 La seguridad vial de los VAC

En esta sección se presentan varios estudios sobre la seguridad de los VAC, destacando los enfoques utilizados, los aspectos de seguridad y el grado en que se han estudiado los distintos niveles de los VAC.

En la última década, los investigadores utilizaron diversas técnicas para determinar el alcance del efecto de los VAC en la seguridad del tráfico, incluido el estudio de datos históricos de colisiones y el trabajo con conjuntos de datos reales de VAC de código abierto, así como el uso de técnicas de simulación y modelización. Se dieron diferentes enfoques:

- Intentar eliminar el efecto del error humano analizando los datos de accidentes registrados anteriormente sin este factor.
- Suponer que los beneficios en materia de seguridad de la conducción autónoma en carretera serían similares a los del transporte ferroviario y aéreo
- Determinar la magnitud preliminar de los beneficios en materia de seguridad y, a continuación, modelizar y simular la conducción autónoma para obtener un conocimiento más profundo.

En consecuencia, el enfoque de modelado de microsimulación se ha utilizado ampliamente en los estudios de seguridad del tráfico VAC debido a su calidad de modelado robusto y la capacidad de construir múltiples escenarios de evaluación operativa [23].

Resumen de los estudios previos

La siguiente tabla resume los estudios previos que han utilizado la simulación para estudiar el impacto de los VAC en la seguridad vial:

Referencia	Simulador	Red de estudio	Tipo de Vehículo	Nivel de Automat.	Medidas de Seguridad	Indicadores de evaluación
[24]	PARAMICS	Red con obras	PAS	2	$t_c=1,5$	Frecuencia de conflictos
[25]	PVT-VISSIM	Intersecciones	PAS,MER	4/5	$t_c=1,5$ $t_{pi}=5$	Frecuencia de conflictos, vehículos implicados
[26]	Personalizado	Carretera convencional 2 carriles	PAS	2	$t_c \in [0.75, 1.5]$ $t_{pi}=5$	Distribución de los t_c , diferencia de aceleración y velocidad
[27]	PVT-VISSIM	Autovía 3 carriles	PAS	4/5	$t_c=1,5$ $t_{pi}=5$	Frecuencia de conflictos, vehículos implicados
[28]	PVT-VISSIM	Autovía arterial	PAS,MER	1,2	$t_c=1,5$ $t_{pi}=5$	Frecuencia de conflictos, severidad

[29]	SMARTS	Autovía, campus, distrito oficinas	PAS	1,2,3,4/5	$t_c=1,5$	Frecuencia de conflictos, sensibilidad
[30]	PVT-VISSIM	Intersecciones urbanas	PAS	4/5	$t_{c0}=1,5$ $t_{cm}=0,5$ $t_{pi0}=5$ $t_{pim}=1,65$	Frecuencia de conflictos, vehículos implicados
[31]	PVT-VISSIM	Autovía 4 carriles	PAS,MER	4/5	$t_c=2$	Severidad
[32]	SUMO	Autovía, ctra. convencional, zona urbana	PAS,MER	2,4/5	$t_{c0}=1,5$ $t_{cm}=0,75$ $t_{pi}=5$ (autovía) $t_{pi}=0,75$ (urbano)	Frecuencia de conflictos, vehículos implicados
[33]	PVT-VISSIM	Autovía 2 carriles	PAS	4/5	$t_c=1,5$ $t_{pi}=5$	Frecuencia de accidentes, severidad
[34]	PVT-VISSIM	Autovía 6 carriles	PAS	4/5	$t_c=1,5$ $t_{pi}=5$	Frecuencia de conflictos, severidad
[35]	Personalizado		PAS	2		MTTC,DRAC
[36]	Aimsun	3 redes distintas	PAS,MER	4/5	$t_c \in [0.5, 1.5]$	Frecuencia de accidentes
[6]	Aimsun	Autovía 2 carriles	PAS,MER	0,1,2,3,4/5	Múltiples t_c	Frecuencia de conflictos, severidad

Tabla 3: Resumen de los estudios previos en seguridad vial de los VAC basados en microsimulación[5]

De esta tabla destacan los siguientes factores:

- **Simuladores:** El más usado es VISSIM, si bien estudios más recientes han comenzado a realizar investigaciones mediante Aimsun.
- **Red de estudio:** Muy variada, incluyendo autovías de varios carriles y multitud de intersecciones urbanas.
- **Tipo de vehículo:** Todos incluyen a los vehículos de pasajeros (PAS), mientras que algunos también incluyen a los vehículos de mercancías (MER).
- **Nivel de automatización (Según SAE):** El nivel más estudiado fue el más elevado. Sin embargo, muy pocos estudios han incluido el estudio de niveles intermedios, así como la combinación al mismo tiempo de distintos niveles.
- **Medidas de seguridad:** que incluyen los siguientes parámetros:
 - t_c como el tiempo hasta la colisión, en segundos, donde se puede distinguir en función de si el vehículo seguidor (el situado detrás de otro) es de un determinado nivel de automatización, sin importar qué nivel tenga el vehículo seguido:
 - t_{c0} en el caso de que el vehículo seguidor sea de nivel 0.
 - t_{cm} en el caso de que el vehículo seguidor sea del máximo nivel (4/5).
 - t_{pi} como el tiempo posterior a la invasión.
- **Indicadores de evolución:** tales como la frecuencia de conflictos, los vehículos implicados, la frecuencia de accidentes y el grado de severidad y sensibilidad. En este punto pueden entrar parámetros muy específicos como el MTTC (tiempo hasta la colisión modificado) o el DRAC (mínima tasa de deceleración para evitar accidentes) entre otros.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos descritos en el apartado 1.3, se seguirá una serie de pasos que se desarrollarán en los siguientes capítulos:

Revisión Bibliográfica: Elección del programa de simulación y del tramo de estudio

Antes de iniciar la fase metodológica propiamente dicha, es necesario definir dos decisiones clave: el programa de simulación a emplear y el tramo de carretera sobre el cual se centra el estudio. Estas elecciones constituyen la base sobre la que se desarrolla todo el trabajo y condicionan tanto la validez de los resultados como la aplicabilidad de las conclusiones. **Tanto la elección del programa como el tramo de estudio se han justificado en la introducción.**

Elección y definición de los modelos y sus parámetros

Consiste en construir el modelo en Aimsun procurando ser lo más fiel a la realidad eligiendo el modelo más adecuado y definiendo, tanto teóricamente como numéricamente, los parámetros para cada uno de los distintos niveles de automatización. Todos los parámetros escogidos estarán basados en una amplia revisión bibliográfica de múltiples estudios de microsimulación en Aimsun.

Las simulaciones se medirán en dos franjas horarias distintas, cada una de 1 hora de duración. La primera tendrá lugar en la hora punta de un día laborable, donde se registra el mayor número de vehículos en circulación de todo el día, mientras que la segunda tendrá lugar en la hora valle, donde la situación del tráfico es más relajada.

En todo momento, la simulación se realizará mediante una combinación fijada de vehículos estándar de pasajeros (coches) y de vehículos pesados o de mercancías (camiones). Los autobuses se considerarán como camiones al tener características similares de anchura y longitud y a que en este estudio la importancia radica en el número de vehículos y no en el número de pasajeros que transitan en el área estudiada. Por otro lado, no se tendrán en cuenta a las motocicletas por los enormes desafíos (dinámica, peso, espacio y equilibrio) que supone su plena automatización.

Una vez completado este paso, se podrán introducir los distintos parámetros para cada clase de vehículo.

Recopilación de datos del área de estudio y del parque motor

Será necesario conocer el área de estudio, en este caso el arco sur de la M-40, en todos sus detalles y características tales como:

- Las intersecciones, los nodos y los puntos de entrada y salida (Convergencias y divergencias). También será necesario conocer los puntos más conflictivos.
- Las velocidades máximas y el número de carriles para cada tramo y sección, así como los carriles de aceleración y deceleración

También será esencial analizar los datos de tráfico con ayuda de los detectores colocados a lo largo de las vías y la clase de vehículos que circulan sobre las mismas, por ejemplo, vehículos ligeros como turismos de hasta 7 plazas o vehículos pesados como camiones y autobuses. En lo que respecta a estos vehículos será muy importante estudiar el parque motor con el objetivo de calcular sus emisiones en los distintos escenarios a simular, tanto en la actualidad como en el futuro. Todo ello implicará realizar una predicción tanto del parque motor (vehículos eléctricos, de gasoil, gasolina, híbridos...) como de los vehículos autónomos para tratar de lograr el mayor grado de realismo posible en lo que respecta a los datos de emisiones.

Construcción del modelo de simulación

Una vez completado este paso, se podrá construir el modelo de simulación (Carreteras, vías, enlaces o nodos de entrada/salida...) así como la introducción de los datos de tráfico. A continuación, se definirán los distintos escenarios, cada uno con un distinto porcentaje de VAC, modelando la introducción real esperada de los diferentes niveles de automatización y conectividad descritos en el paso anterior junto a la evolución esperada del parque motor. Cada escenario deberá realizarse con el número de simulaciones indicadas

Calibración y validación del modelo

Previamente se realizará una calibración para validar que el modelo se desenvuelva de manera fluida. Se aceptará la modificación de parámetros específicos de ciertas secciones del área de estudio o incluso de parámetros generales del experimento para asegurar la correcta calibración. La presente calibración se efectuará utilizando los datos de tráfico más recientes disponibles y a su vez sin ningún VAC en circulación. Las diferentes calibraciones pasarán por unos criterios de validación antes de proceder a la simulación de los escenarios:

- El correcto funcionamiento de la simulación en todos los escenarios a recrear: no podrán ocurrir colapsos ni tampoco podrán quedar secciones en las que no circule ningún vehículo.
- La concordancia entre los datos obtenidos de la simulación y los datos procedentes de las mediciones de tráfico.

Simulación de los escenarios

Una vez se cumplan estos criterios, el modelo quedará validado y se podrá simular los escenarios. Al finalizar las simulaciones, se pasará a la última etapa de evaluación e interpretación de los resultados.

Evaluación e interpretación de los resultados

Consiste esencialmente en investigar, por un lado, la seguridad en la carretera en relación con el período de transición entre la conducción humana y la conducción autónoma y también, por otro lado, la cantidad de contaminantes emitidos. Esta evaluación incluye:

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

1. Cuantificar el efecto de seguridad basado en la armonía de la dinámica del vehículo, el número de conflictos graves identificados y la implicación de VAC con diferentes niveles de autonomía en los conflictos.
2. Investigar las diferencias entre los escenarios para las distintas variables tales como las velocidades, los tiempos de recorrido, de retraso y la cantidad de tráfico medido.
3. Investigar la influencia del CACC en el modelo longitudinal comparando escenarios en los que el CACC está activado y desactivado respectivamente.
4. Investigar el grado y las diferencias de los distintos contaminantes en función de los VAC introducidos, así como de la evolución del parque motor. Estos contaminantes son el CO, CO₂, NO_x, VOC y PM₁₀.
5. Realizar una serie adicional de simulaciones para cuantificar el nivel de contaminantes emitidos imputables a la automatización. Para ello, todos los escenarios deberán tener la misma distribución del parque motor y distinguirse solamente por su grado de automatización.

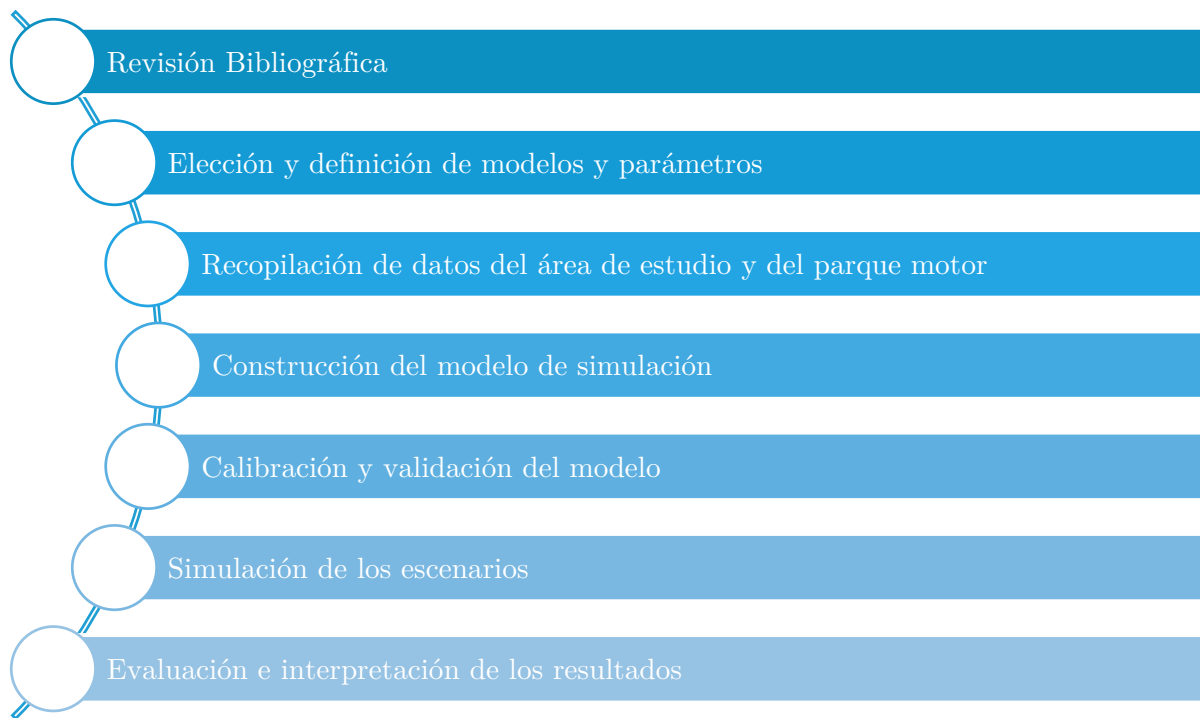


Figura 5: Resumen de las distintas etapas de la metodología

CAPÍTULO 4: DEFINICIÓN DE LOS MODELOS Y SUS PARÁMETROS

4.1 Funcionamiento de los modelos

4.1.1 El modelo microscópico o de asignación dinámica de tráfico

De entre los tres modelos que Aimsun ofrece para realizar una simulación (microscópico/dinámico, macroscópico/estático y mesoscópico), el modelo ideal para esta investigación es el modelado microscópico o dinámico. Este modelo se basa en el movimiento individual de cada vehículo y su comportamiento cuando interactúan con el resto de los vehículos que circulan por la red. De este modo se podrán analizar las características de la red, así como todos los problemas que surjan tras realizar la microsimulación.

El modelo microscópico funciona a través de uno o varios escenarios, en los cuales se deberá definir uno o varios experimentos, cada uno con un número definido de replicaciones.

- En el escenario se debe definir la demanda de tráfico, la cual podrá ser definida mediante matrices OD (Origen – Destino) donde se define el número de vehículos que circularán desde una entrada hasta una salida, o bien mediante los estados de tráfico. En los estados de tráfico se indica el flujo de vehículos por hora que circula desde una sección a otra, determinando de forma meticulosa la cantidad de vehículos que toman una salida, que continúan por la autopista o que se incorporan a la misma, en todos sus tramos.
- En el experimento se determina el comportamiento de los vehículos mediante la modificación de distintos parámetros.
- Cada replicación simula el comportamiento de los vehículos de forma aleatoria, a partir de una semilla.

Finalmente, tras realizar la microsimulación, se podrán extraer distintas variables tales como el flujo, velocidad o densidad del tráfico, tiempos de viaje y de demora, longitud de colas, tiempo y número de paradas, distancia recorrida, consumo de combustible y emisiones producidas, entre otras.

4.1.2 Funcionamiento del modelo del Seguimiento de vehículos

Aimsun se basa en los modelos de Gipps [37] para calibrar los parámetros de control de las decisiones de seguimiento de vehículos en el algoritmo en función de cada nivel de automatización. Tanto la aceptación del límite de velocidad, límites de velocidad en cada sección y el impacto de los vehículos en los carriles adyacentes pueden modificarse dentro de la microsimulación. Sin embargo, las velocidades se basan en una serie de fórmulas:

La velocidad del vehículo n durante el intervalo dt es el mínimo de las velocidades v_a y v_b :

$$v(n, t + dt) = \min \{v_a(n, t + dt), v_b(n, t + dt)\}$$

Donde la velocidad v_a es la máxima velocidad que puede alcanzar un vehículo sin tráfico, donde $a > 0$ es la aceleración (del vehículo n) y T el tiempo de reacción:

$$v_a(n, t + dt) = v(n, t) + 2,5a(n) \cdot T \cdot \left(1 - \frac{v(n, t)}{v_d}\right) \cdot \sqrt{0,025 + \frac{v(n, t)}{v_d}}$$

Y la velocidad v_b es la máxima velocidad que puede alcanzar un vehículo (n) cuando tiene un vehículo delante ($n-1$), donde x es la posición del vehículo situado delante ($n-1$), s es la longitud del vehículo de delante ($n-1$), $d < 0$ es la deceleración máxima (del vehículo n):

$$v_b(n, t + dt) = d(n) \cdot T + \sqrt{d^2(n) \cdot T^2 - d(n) \cdot \left[2(x(n-1), t) - s(n-1) - x(n, t) - v(n, t) \cdot T - \frac{V^2(n-1, t)}{d_e(n-1)}\right]}$$

Donde d_e es la deceleración deseada del vehículo situado delante ($n-1$), que es función del factor de sensibilidad α :

$$d_e(n-1) = d(n-1) \cdot \alpha$$

La posición, en la fase de aceleración, se calcula integrando la velocidad:

$$x(n, t + dt) = x(n, t) + \int v(n, t + dt) dt$$

Mientras que se usa el método trapezoidal para calcular la posición en la fase de deceleración:

$$x(n, t + dt) = x(n, t) + 0,5 \int (v(n, t + dt) + v(n, t)) dt$$

Antes de actualizar la posición $x(n, t+T)$, se aplica la restricción del avance mínimo ($minHW$):

$$\begin{aligned} \text{Si: } & x(n-1, t+T) - [x(n, t) + v(n, t+T) \cdot T] < v(n, t+T) \cdot minHW(n) \\ \text{entonces: } & v(n, t+T) = \frac{x(n-1, t+T)}{minHW(n) + T} \end{aligned}$$

4.1.3 Funcionamiento del modelo del Cambio de carril

Hay cinco aspectos a simular para el cambio de carril de los vehículos en los tramos:

- Cálculo de la distancia de la zona de cambio de carril,
- Cálculo de los carriles objetivo,
- Consideración de los carriles objetivo por parte de los vehículos,
- Aceptación de los tamaños de los huecos de cambio de carril, y
- Cooperación con el hueco objetivo.

Para usar el modelo de aceptación de huecos manteniendo la coherencia del modelo de seguimiento de vehículos, Gipps [37] impuso dos limitaciones clave para lograr este objetivo y evitar que se produzcan situaciones de avería artificiales:

1. El modelo de seguimiento de coches de Gipps es estable (no necesita deceleraciones superiores a la deceleración máxima requerida).
2. Para evitar colisiones y seguir a un nuevo líder en el carril objetivo, el hueco y la velocidad deben seguir siendo positivos durante la fase de ralentización y en su conclusión.

4.1.4 Conectividad entre vehículos V2V: ACC vs. CACC

Mediante la creación de una Red Ad-hoc de Vehículos (VANet) utilizando la extensión V2X Aimsun next (V2X Software Development Kit (SDK)) además de la API Aimsun incorporada en CACC, la conectividad de los vehículos es modelada en la presente investigación.

Los vehículos equipados con ACC regulan los huecos mediante los siguientes parámetros:

Se define la aceleración recomendada por el controlador ACC, donde v_{ACC} es la velocidad actual del vehículo, k_2 el factor de adecuación de la distancia, k_3 el factor de adecuación de la velocidad en seguimiento, d la distancia entre parachoques frontales, L la longitud del vehículo delantero, t el margen de tiempo deseado y v_1 la velocidad actual del vehículo delantero:

$$a_{ACC} = k_2 \cdot (d - t \cdot v_{ACC} - L) + k_3(v_1 - v_{ACC})$$

En el caso de flujo libre, no se regulan los huecos, definiendo la aceleración como:

$$a_{ACC} = k_1 \cdot (v_f - v_{ACC})$$

Donde k_1 es el factor de adecuación de la velocidad en flujo libre y v_f es la velocidad en flujo libre

En el caso de los vehículos equipados con CACC, disponen de los siguientes parámetros para regular los huecos:

Se define la aceleración recomendada por el controlador CACC, donde Δt es el paso de tiempo para cada actualización como:

$$a_{CACC} = v_{CACC}(t) - \frac{v_{CACC}(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

Asimismo, se define la velocidad recomendada por CACC, donde k_p es la ganancia de distancia (en s^{-1}) y k_d es la ganancia de velocidad, ambas definidas en los parámetros de AIMSUN:

$$v_{CACC}(t) = v_{CACC}(t - \Delta t) + k_p \cdot e_t(t) + k_d \cdot e_v(t)$$

Donde e_t es el error del hueco (en segundos), e_v el error de la velocidad y t_g es el margen temporal del líder:

$$e_t(t) = d(t - \Delta t) - t_g \cdot v_{CACC}(t - \Delta t) - L; e_v(t) = v_1(t - \Delta t) - v_{CACC}(t - \Delta t) - t_g \cdot a_{CACC}(t - \Delta t)$$

Por último, la extensión V2X SDK de Aimsun proporciona un canal codificado por objetos por defecto, simplificando el protocolo a la hora de diseñar las importantes características del canal de fiabilidad y el alcance de la comunicación, que se expresan por la pérdida de paquetes (el porcentaje de paquetes no recibidos), el alcance de la transmisión y la latencia (que refleja el retraso en la transmisión de paquetes).

Se aplicarán las características del IEEE 802.11p en la red VANet, ya que la conexión V2V requiere un canal de corto alcance, siendo el rango de 250 metros el canal elegido. Además, se ha demostrado experimentalmente su eficiencia entre los 250 y 300 metros [38].

4.1.5 Modelo de evaluación de seguridad SSAM

El modelo SSAM (Surrogate Safety Assessment Model) predice la seguridad de las carreteras antes de producirse un accidente. Combina la microsimulación y el análisis automatizado de conflictos, que analiza la frecuencia y las características de las colisiones entre vehículos que se evitan por poco en el tráfico, con el fin de evaluar la seguridad de las instalaciones de tráfico sin esperar a que se produzca un número de accidentes y lesiones estadísticamente superior a la media [39].

SSAM analiza las interacciones entre vehículos para identificar eventos conflictivos y cataloga todos los eventos encontrados. Para cada uno de estos eventos, SSAM también calcula varias medidas de seguridad sustitutivas, entre las que se incluyen las siguientes:

- Tiempo mínimo hasta la colisión (TTC).
- Post-invasión mínima (PET).
- Tasa de desaceleración inicial (DR).
- Tasa de desaceleración máxima (MaxD).
- Velocidad máxima (MaxS).
- Diferencial de velocidad máxima (DeltaS).
- Clasificación como tipo de evento de cambio de carril, colisión trasera o cruce de trayectoria.
- Cambio de velocidad del vehículo si el evento hubiera derivado en un choque (DeltaV).

4.1.6 Modelos Medioambientales

Aimsun ofrece 5 modelos medioambientales [40]:

- **Modelo de consumo de combustible:** El modelo de consumo de combustible solo se aplica a los vehículos con motor de combustión (gasolina, diésel o GLP). Se parte del supuesto de que cada vehículo está al ralentí, circulando a velocidad constante, acelerando o desacelerando. El simulador determina el estado de cada vehículo en cada intervalo de tiempo y, a continuación, el modelo utiliza la fórmula adecuada para calcular el combustible consumido en el estado determinado.
- **Modelo de consumo de baterías:** Aplica solo a vehículos eléctricos. El modelo depende de la dinámica del vehículo, lo que significa que primero debe activarse el modelo de combustible para que el modelo de consumo de batería se pueda aplicar a los vehículos eléctricos.
- **Modelo de emisiones QUARTET:** Requiere que, para cada vehículo, se introduzca la cantidad de contaminante (CO, NOx...) que emite, en gramos por segundo, tanto en su aceleración, deceleración y al ralentí y a distintas velocidades.
- **Modelo de emisiones de Panis:** Cada tipo de vehículo incluido en la simulación debe tener definidos sus parámetros de emisiones instantáneas. El modelo indicará la cantidad de contaminantes emitidos de CO₂, NOx, Compuestos volátiles y PM₁₀. **Se usará en este estudio. Este modelo se rige mediante la siguiente ecuación:**

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2v_n(t) + f_3v_n(t)^2 + f_4a_n(t) + f_5a_n(t)^2 + f_6v_n(t)a_n(t)]$$

Donde $v_n(t)$ y $a_n(t)$ son la velocidad y aceleración instantánea n del vehículo n en el instante t . Las variables de entrada son E_0 , un límite inferior de emisión en g/s y f_i , constantes de emisión

- **Modelo de emisiones de Londres (LEM) y COPERT:** Estima las emisiones de CO₂, CO, NOx Y PM10 introduciendo el porcentaje de vehículos que circulan según las normas EURO 0 a 6. **Se usará en este estudio.**

4.2 La definición de los parámetros teóricos

Antes de definir los parámetros en Aimsun, es necesario conocer las definiciones de los parámetros tal como se presentan en el manual del usuario de Aimsun, actualizado según la versión 24.0.2 [41], y en investigaciones anteriores que sirven de guía para su correcta calibración. Dichos parámetros se encuentran en dos modelos: dinámico y microscópico, dentro de las características de cada vehículo.

4.2.1 Definiciones de las características propias de cada vehículo

Todas estas características no se modificarán y se dejarán las predeterminadas por Aimsun para el coche o vehículo estándar: Longitud y anchura, ambas en metros, velocidad máxima deseada (km/h) y la máxima capacidad de pasajeros. Para el vehículo pesado se modificará la longitud y anchura para tener en cuenta los diferentes tipos de vehículos pesados que pueden circular.

4.2.2 Definiciones del modelo dinámico

En la pestaña principal:

- **Aceptación del límite de velocidad:** Este parámetro puede interpretarse como el «nivel de bondad» de los conductores o el grado de aceptación de los límites de velocidad. Cuando es mayor que 1 significa que el vehículo tomará como velocidad máxima para un tramo un valor superior al límite de velocidad, mientras que cuando es menor que 1 significa que el vehículo utilizará un límite de velocidad inferior.
- **Espacio libre:** Es la distancia, en metros, que un vehículo mantiene entre sí y el vehículo precedente cuando está parado.
- **Tiempo máximo de ceda el paso:** Cuando un vehículo se encuentra en una situación de ceda el paso o de stop en un cruce o en una rampa de acceso en una autopista, aplica el modelo normal de aceptación de huecos o un modelo de cambio de carril para cruzar o incorporarse al tráfico, respectivamente. Cuando un vehículo ha estado parado durante más de este tiempo de cesión (en segundos), se volverá más agresivo y reducirá los

CAPÍTULO 4: DEFINICIÓN DE LOS MODELOS Y SUS PARÁMETROS

márgenes de aceptación. Este periodo también se utiliza en el modelo de cambio de carril como el tiempo que un vehículo acepta estar parado mientras espera a que se cree un hueco en el carril de giro deseado antes de ceder y seguir adelante. Este parámetro no se modificará y permanecerá según los valores predeterminados, para todos los vehículos.

- **Nivel de aceptación del guiado:** Este parámetro representa la probabilidad de que un vehículo siga una recomendación o indicación de guiado como la información facilitada a través de las Señales de Mensaje Variable o de determinados Sistemas de Guiado de Vehículos.
- **Los valores del peso del vehículo no se modificarán, ni tampoco afectará a su velocidad en pendientes.**
- Del mismo modo, el coste del vehículo no se definirá (permanecerá nulo) al no entrar este parámetro en este estudio.

En la pestaña motor se indican, en porcentaje, el total de vehículos de la simulación que usan motores diésel, eléctricos, GLP (Gas licuado del petróleo) y de gasolina. Dentro de los modelos de emisiones se especifican los modelos EURO 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

En la pestaña Valores del experimento, se modificarán los siguientes parámetros:

- **Tiempo de reacción:** Es el tiempo que tarda un conductor en reaccionar a los cambios de velocidad del vehículo precedente. Se modificará tanto en la simulación mesoscópica como en la microscópica.
- **Tiempo de reacción en parada:** Es el tiempo que tarda un vehículo parado en reaccionar a la aceleración del vehículo que le precede.

En ambos casos solo se definirá una línea de experimentación, que suma la probabilidad completa (1). El tiempo de reacción en semáforo no aplica al no existir semáforos en el área de estudio. En la asignación dinámica de tráfico tampoco se modificarán los parámetros predeterminados.

4.2.3 Definiciones del modelo microscópico

En la pestaña principal:

- **Aceleración máxima:** en m/s^2 , que el vehículo alcanza en cualquier circunstancia.
- **Deceleración normal:** en m/s^2 , que el vehículo alcanza en situaciones normales.
- **Deceleración máxima:** en m/s^2 , que el vehículo alcanza en situaciones excepcionales. Múltiples estudios consideran que este valor debería permanecer constante según avanza el nivel de automatización.
- **Factor del margen de seguridad:** proporciona un multiplicador, con un rango normal truncado, para aplicar a los valores del margen de seguridad de giro. En los cálculos de aceptación de huecos para determinar cuándo puede moverse un vehículo en un cruce prioritario, el margen de seguridad se establece en los parámetros de giro del tipo de carretera.

- **Espacio libre lateral:** Las variaciones de separación lateral de vehículo a vehículo proceden de distribuciones definidas por el tipo de vehículo. La distancia lateral mínima entre dos vehículos es la suma de las distancias laterales de ambos vehículos.
- **Velocidad máxima lateral:** Al desplazarse lateralmente, los vehículos utilizan su velocidad lateral máxima.

En el modelo de seguimiento de vehículos:

- **Factor de sensibilidad:** En el componente de deceleración del modelo coche-seguidor, el seguidor realiza una estimación de la deceleración del líder utilizando el factor de sensibilidad.

En el modelo de cambio de carril:

- **Factor de la distancia de anticipación:** se utiliza para modificar las distancias de anticipación utilizadas en el Modelo de Cambio de Carril para determinar dónde consideran los vehículos su elección de carril para un próximo giro.
- **El umbral de velocidad para el adelantamiento y el de recuperación de carril:** en porcentaje, controlan las maniobras de adelantamiento. Si el vehículo se ve obligado a circular a una velocidad inferior al Umbral de Velocidad de Adelantamiento de su velocidad deseada, considerará la posibilidad de realizar una maniobra de adelantamiento. El Umbral de Velocidad de Recuperación de Carril es el porcentaje de la velocidad deseada de un vehículo por encima del cual un vehículo decidiría volver al carril original.
- **El porcentaje de Permanencia en el carril de adelantamiento:** en porcentaje, define la probabilidad de que un vehículo de este tipo permanezca en el carril más rápido en lugar de recuperarse al carril más lento tras una maniobra de adelantamiento.
- **El cambio de carril Imprudente:** Define si un vehículo de este tipo seguirá cambiando de carril después de evaluar un espacio inseguro. Solamente puede estar activado o no.

Tanto en el modelo de seguimiento de vehículos como en el modelo de cambio de carril, se guardará el mismo valor para el parámetro de **Agresividad en el tiempo entre vehículos:** El parámetro de agresividad de los adelantamientos modifica la relación de la distancia entre vehículos en función de la velocidad.

4.2.4 Definiciones del modelo estático y atributos

La pestaña de modelos estáticos se activa cuando se quiere estudiar la demanda de desplazamientos junto a la medida del espacio que necesita un tipo de vehículo. En este estudio no se le dará ningún valor, ya que solo se trabaja con el modelo microscópico o dinámico. Por último, se activará en la pestaña atributos una calibración más avanzada referida al parámetro:

- **Distancia entre vehículos (definido como hueco):** en segundos, entre el parachoques delantero de un vehículo y el parachoques delantero del vehículo que le sigue.

4.2.5 Definiciones del experimento

- **Tiempo de Calentamiento:** Tiempo ficticio anterior al inicio del periodo de simulación durante el que han estado circulando vehículos virtualmente.
- **Paso de Simulación:** Intervalo de tiempo, en segundos durante el cual no se representan vehículos en la red.
- **Llegadas:** La forma en la que los vehículos se incorporan a la simulación puede ser:
 - Exponencial: Reparte las llegadas de forma totalmente aleatoria. Este es el modelo más realista.
 - Uniforme/Normal: Las llegadas se distribuyen de manera más controlada que en el modo exponencial.
 - Constante: Se introducen constantemente vehículos en la red, el mismo número de vehículos por segundo.
 - ASAP (As soon As Possible): Introduce todos los vehículos de forma inmediata al inicio de la simulación.

4.3 La definición de los parámetros en Aimsun

Todos los parámetros definidos en Aimsun se han basado en el estudio más reciente [6] sobre microsimulación en Aimsun cuya área de estudio fue en una autovía, donde sus resultados se acercaron significativamente a lo esperado: menores conflictos y mayor fluidez cuando se introducían vehículos de elevado nivel de automatización.

4.3.1 Características comunes a todos los vehículos

Para todos los niveles de automatización:

	Tipo de vehículo	Vehículo estándar (coche)				Vehículo pesado (camión)			
		MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO
Principales	Longitud (m)	4	0,5	3,5	4,5	8,5	2,5	6	16,5
	Anchura (m)	1,8	0,2	1,6	2	2,55	0,2	2,3	2,8
	Máxima velocidad deseada (km/h)	110	10	80	150	85	10	70	100
	Capacidad máxima	4	-	-	-	2	-	-	-
Dinámicos	Tiempo máximo de ceda el paso (s)	10	2,5	5	15	35	10	20	60
	Valor del tiempo (\$/h)	0	0	0	0	0	0	0	0
	Peso (kg)	1300	400	800	2550	13608	22680	4536	46000

Microscópicos	Deceleración Máxima (m/s ²)	6	0,5	5	7	5	0,5	4	6
	Aceleración Máxima (m/s ²)	3	0,2	2,6	3,4	1	0,5	0,6	1,8
	Deceleración Normal (m/s ²)	4	0,25	3,5	4,5	3,5	1	2,5	4,8
	Espacio libre lateral (m)	0,3	0,1	0,2	0,45	0,3	0,1	0,1	0,5
	Velocidad Máxima lateral (km/h)	3	0	3	3	3	0	3	3

Tabla 4: Medias y desviaciones de parámetros sobre características comunes a todos los vehículos. Datos procedentes de [6, p. 65]

4.3.2 Modelos Dinámicos

En el apartado MODELOS DINÁMICOS, los parámetros por defecto del experimento serán los siguientes:

- El tiempo de reacción en movimiento será de:
 - 0,8 segundos para los niveles 0, 1 y 2.
 - 0,4 segundos para el nivel 3.
 - 0,1 segundos para los niveles 4 y 5.
- El tiempo de reacción en parada será de:
 - 1,2 segundos para los niveles 0 y 1 para vehículos estándar y de 1,3 en los pesados.
 - 1,1 segundos para el nivel 2 para vehículos estándar y de 1,2 en los pesados.
 - 1 segundo para el nivel 3.
 - 0,1 segundos para los niveles 4 y 5.
- El tiempo de reacción para el primer vehículo en semáforo no aplica en este estudio (no hay semáforos en el tramo estudiado). La probabilidad se fija en 1 para todos los casos.

Los parámetros de aceptación del límite de velocidad, espacio libre y nivel de aceptación del guiado dependerán no solo del nivel de automatización del vehículo, sino también de si el mismo es estándar (E) o pesado (P):

Nivel de automatización		Nivel 0				Nivel 1				Nivel 2				Nivel 3				Nivel 4/5			
Parámetros	VEHÍCULO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO
Aceptación del límite de Velocidad	E	1,1	0,1	0,9	1,3	1,1	0,05	1	1,2	1,05	0,05	0,95	1,15	1	0,05	0,9	1,1	1	0,05	0,9	1,1
	P	1,05	0,1	0,85	1,25	1,05	0,1	0,85	1,25	1,05	0,05	0,95	1,15	1	0,05	0,9	1,1	1	0,05	0,9	1,1
Espacio Libre (m)	E	1	0,3	0,5	1,5	1	0,2	0,6	1,4	1	0,2	0,6	1,4	0,7	0,1	0,5	0,9	0,5	0,1	0,4	0,6
	P	1,5	0,5	1	2,5	1,5	0,5	1	2,5	1,2	0,3	1	1,4	1	0,1	0,8	1,2	0,7	0,05	0,65	0,75
Nivel de aceptación del Guiado (%)	E	70	10	50	90	80	10	60	100	80	10	60	100	90	5	80	100	100	0	100	100
	P	100	10	80	100	100	10	80	100	100	10	80	100	100	5	90	100	100	0	100	100

Tabla 5: Medias y desviaciones de parámetros en los modelos dinámicos. Datos procedentes de [6, p. 65]

CAPÍTULO 4: DEFINICIÓN DE LOS MODELOS Y SUS PARÁMETROS

Por último, se definirá más adelante (**Apartado 5.3.2**) el porcentaje de vehículos con emisiones estándar EURO 0 a 6 tanto en el modelo de Emisiones de Londres como en el COPERT solamente para vehículos con motor de gasolina, diésel y LPG.

4.3.3 Modelos Microscópicos

En el apartado MODELOS MICROSCÓPICOS, los parámetros del modelo de cambio de carril tanto para vehículos estándar y pesados serán los siguientes:

- El umbral de velocidad para el adelantamiento será del:
 - 90% para los niveles 0, 1 y 2.
 - 85% para los niveles 3, 4 y 5.
- El umbral de recuperación de carril será del 95% en todos los niveles.
- El porcentaje de Permanencia en el carril de adelantamiento será del 0% siempre.
- El cambio de carril Imprudente estará:
 - ACTIVADO para los niveles 0, 1 y 2.
 - DESACTIVADO para los niveles 3, 4 y 5.
- La cooperación para la creación de espacio intervehicular estará:
 - DESACTIVADA para los niveles 0, 1 y 2.
 - ACTIVADA para los niveles 3, 4 y 5.
- El modelo de adelantamiento en vías de dos sentidos no aplica en este estudio.

Los parámetros de aceleración máxima, deceleración normal y los factores dependerán no solo del nivel de automatización del vehículo, sino también de si el mismo es estándar (**E**), pesado (**P**) o ambos (**A**):

Nivel de automatización		Nivel 0				Nivel 1				Nivel 2				Nivel 3				Nivel 4/5			
Parámetros	VEHÍCULO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO
Factor margen de seguridad	A	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0,1	0,8	1,2	1,25	0,1	1,1	1,4	1,5	0,2	1,2	1,8
Factor de sensibilidad	A	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0,1	0,8	1,2	1,1	0,1	0,9	1,3	1,2	0,1	1	1,4
Factor distancia anticipación	A	-	-	0,8	1,2	-	-	0,8	1,2	-	-	0,8	1,2	-	-	1	1,25	-	-	1,1	1,3
Nivel agresivid. Tpo. Entre veh.	A	-	-	0	1	-	-	0	1	-	-	0	0,5	-	-	0	0	-	-	0	0

Tabla 6: Medias y desviaciones de parámetros en los modelos microscópicos. Datos procedentes de [6, p. 65]

4.3.4 Modelos Microscópicos-Medioambientales

En el apartado modelos medioambientales se define el modelo de emisiones de Quartet y de Panis et al y el de consumos de energía. En el caso del modelo de Emisiones de Panis et al, se dejarán los valores predeterminados por Aimsun:

Contaminante	Tipo de Vehículo	E_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
CO_2	GASOLINA	0	5,53E-01	1,61E-01	-2,89E-03	2,66E-01	5,11E-01	1,83E-01
	DIESEL	0	3,24E-01	8,59E-02	4,96E-03	-5,86E-02	4,48E-01	2,30E-01
	LPG	0	6,00E-01	2,19E-01	-7,74E-03	3,57E-01	5,14E-01	1,70E-01
	CAMION	0	1,52E+00	1,88E+00	-6,95E-02	4,71E+00	5,88E+00	2,09E+00
NO_x	GASOLINA ($a \geq -0,5$ m/s ²)	0	1,62E-04	8,00E-06	-4,03E-06	-1,43E-05	0,00E+00	1,70E-05
	GASOLINA ($a < -0,5$ m/s ²)	0	2,17E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	DIESEL ($a \geq -0,5$ m/s ²)	0	2,41E-03	-4,11E-04	6,73E-05	-3,07E-03	2,14E-03	1,50E-03
	DIESEL ($a < -0,5$ m/s ²)	0	1,68E-03	-6,62E-05	9,00E-06	2,50E-04	2,91E-04	1,20E-04
	LPG ($a \geq -0,5$ m/s ²)	0	8,92E-04	-1,61E-05	-8,06E-06	-8,23E-05	7,60E-05	3,54E-04
	LPG ($a < -0,5$ m/s ²)	0	3,43E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	CAMION	0	3,56E-02	9,71E-03	-4,20E-04	3,26E-02	1,33E-02	1,50E-03
COV	GASOLINA ($a \geq -0,5$ m/s ²)	0	4,47E-04	7,32E-06	-2,87E-08	-3,41E-05	4,94E-05	3,54E-04
	GASOLINA ($a < -0,5$ m/s ²)	0	2,63E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	DIESEL ($a \geq -0,5$ m/s ²)	0	2,20E-05	-9,09E-05	-2,29E-06	-2,20E-05	1,69E-05	1,15E-02
	DIESEL ($a < -0,5$ m/s ²)	0	5,25E-05	7,22E-06	-1,87E-06	0,00E+00	-1,02E-05	7,57E-03
	LPG($a \geq -0,5$ m/s ²)	0	1,44E-02	1,74E-07	-6,82E-09	-8,11E-07	1,18E-06	1,66E-06
	LPG($a < -0,5$ m/s ²)	0	8,42E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
	HDV	0	1,04E-03	4,87E-04	1,49E-05	1,27E-03	2,10E-04	3,75E-06
PM_{10} (PS)	GASOLINA	0	0,00E+00	1,57E-05	9,21E-07	0,00E+00	3,75E-05	3,96E-07
	DIESEL	0	0,00E+00	3,13E-04	1,84E-06	0,00E+00	7,50E-04	0,00E+00
	LPG	0	0,00E+00	1,57E-05	9,21E-07	0,00E+00	3,75E-05	1,89E-05
	HDV	0	2,14E-04	3,35E-04	2,22E-05	2,07E-03	1,80E-03	2,27E-04

Tabla 7: Modelo de emisiones de Panis: Factores por contaminante predeterminados por Aimsun

Las emisiones del vehículo n en el instante t se calcula mediante la siguiente ecuación, donde v es su velocidad y a su aceleración, ambas en el instante t :

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2v_n(t) + f_3v_n(t)^2 + f_4a_n(t) + f_5a_n(t)^2 + f_6v_n(t)a_n(t)]$$

4.3.5 Atributos

En este apartado solo se define la distancia entre vehículos (entre parachoques frontales), en segundos (definido en AIMSUN como hueco):

Nivel de automatización		Nivel 0				Nivel 1				Nivel 2				Nivel 3				Nivel 4/5			
Parámetros	VEHÍCULO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIAC.	MÍNIMO	MÁXIMO
Distancia (s) entre vehículos	E	1,2	0,2	0,8	1,6	1	0,2	0,6	1,4	0,8	0,1	0,6	1	0,8	0,05	0,7	0,9	0,6	0,05	0,5	0,7
	P	1,5	0,2	1,1	1,9	1,5	0,2	1,1	1,9	1	0,1	0,8	1,2	1	0,05	0,9	1,1	0,8	0,05	0,7	0,9

Tabla 8: Medias y desviaciones de parámetros en los atributos. Datos procedentes de [6, p. 65]

4.3.6 Conectividad: ACC y CACC

- **Vehículos de nivel 0:** ambas permanecerán desactivadas (0% de los vehículos equipados con ambas tecnologías).
- **Vehículos de nivel 1 y 2:** se estima que el 30% lleva equipado el ACC, mientras que el 100% de los vehículos de nivel 2 lo incluyen. Para los casos en los que un vehículo lleve equipado un ACC, se ajustarán así los parámetros:
 - Factor de adecuación de la velocidad en flujo libre de $0,4 \text{ s}^{-1}$.
 - Factor de adecuación de la velocidad en seguimiento de $0,07 \text{ s}^{-1}$.
 - Factor de adecuación de la distancia en $0,23 \text{ s}^{-2}$.
 - Cota Inferior de distancia intervehicular de 100 m.
 - Cota Superior de distancia intervehicular de 200 m.
 - Margen de tiempo deseado idéntico al definido en la distancia entre vehículos (en segundos) en el apartado 3.4.4 para el nivel 1, según la clase de vehículo.
- **Vehículos de niveles 3 y 4/5:** tendrán el 100% de los vehículos equipados con ACC, mientras que algunos podrían tener el CACC activado con los siguientes parámetros:
 - Ganancia de velocidad: $0,0125$.
 - Factor de adecuación de la distancia: $0,45 \text{ s}^{-1}$.
 - Margen temporal del líder: 1,5 s.
 - Cota inferior de margen temporal: 1,5 s.
 - Cota superior de margen temporal: 2 s.
 - Margen temporal del seguidor: 0,6 s.
- Debido a que el porcentaje de vehículos que llevarán CACC incorporado en los vehículos de niveles 3 y 4 es totalmente desconocido (en el caso único del nivel 5 debería ser la totalidad), se optará por realizar replicaciones del modelo tanto con el CACC activado como desactivado. **De esta manera, se podrá estudiar la influencia del CACC en el modelo longitudinal. Para ello se realizará lo siguiente:**

- Creación de un escenario con los vehículos de niveles 3, 4 y 5 con el 100% con ACC equipado y el 0% con CACC equipado.
- Duplicación del escenario anterior, pero con vehículos de nivel 4/5 con el 100% de vehículos equipados con CACC y el 0% con ACC.
- Se simularán ambos escenarios para compararlos entre sí.

4.3.7 Parámetros Generales a nivel experimento

- El tiempo de calentamiento lo define los estados de tráfico y la duración de la franja horaria (1 hora).
- El paso de simulación: Coincidirá con el menor tiempo de reacción que exista. Este tiempo está definido según el nivel del vehículo.
- La llegada de los vehículos será constante solamente para el caso de la calibración, mientras que en todos los experimentos en los que se evaluarán los resultados se asignará la exponencial al ser la más realista.
- El resto de los parámetros (Tiempo de ciclo, número de intervalos, capacidad y coste) no se modificarán o bien se dejarán a 0 al no formar parte del estudio.

CAPÍTULO 5: ÁREA DE ESTUDIO Y SU PARQUE MOTOR

5.1 Descripción de la Autopista M-40

Se definirá a la M-40 (Circunvalación de Madrid) como autopista, si bien no está realmente definido que sea autovía o autopista tal y como se indica en la Ley 37/2015 [42].

5.1.1 Situación inicial: Inauguración

Como es sabido, los cinturones o rondas urbanas son todas aquellas carreteras o vías urbanas que cumplen funciones de circunvalación para los movimientos de paso que atraviesan la ciudad. Sin embargo, no sólo el tráfico de paso utiliza este viario, sino que también el tráfico urbano de penetración puede utilizar la circunvalación para desplazarse de una parte de la ciudad a otra [43].

La autopista de circunvalación de Madrid M-40 comenzó su construcción el 11 de noviembre de 1988, si bien en 1982 se inauguró el primer tramo de 4 kilómetros de un solo carril por sentido entre Mercamadrid y el nudo de Pavones que enlaza con la autovía A-3 (N-III en aquel entonces). Su construcción completa finalizó el 23 de diciembre de 1996 con la inauguración de los últimos 3,5 kilómetros que discurren junto a la tapia del Monte de El Pardo, siendo estos los más caros y complejos de toda la autopista. De este modo, se finalizaba el círculo de 61,1 kilómetros cuya construcción completa había costado un total de 84.000 millones de pesetas [44].

En su primer año de apertura, la M-40 ha permitido mejorar sensiblemente otras zonas de la ciudad, al permitir aumentar la fluidez del tráfico, bajando la congestión del mismo en los diez primeros kilómetros de la autovía A-6 (N-VI), en la propia M-30, en la Avenida de la Ilustración, otras partes de la M-40 y vías adyacentes, gracias a un mejor reparto de los flujos de tráfico sobre la red y al nivel de utilización de los diversos medios de transporte.

En lo que se refiere al tramo de estudio: el arco o distribuidor sur, se inauguró el 29 de noviembre de 1990, así como el tramo sur del By-Pass de la carretera N-IV (actual A-4).

El Distribuidor Sur Metropolitano es un desarrollo viario incluido en el Plan General de Ordenación Urbana (PGOU) de Madrid entonces vigente que, partiendo de la carretera de Extremadura (N-V/A-5) a la altura de San José de Valderas (Alcorcón), discurre en dirección este, conectando con la carretera de Toledo (N-401/A-42) y la carretera de Andalucía (N-IV/A-4) para cerrar junto al ya existente tramo entre Mercamadrid y el distribuidor Este en el enlace de la carretera de Valencia (N-III/A-3), el cual fue puesto en servicio como autopista en 1989. Ambos tramos forman parte del estudio del presente investigación, completando un total de 17,5 kilómetros entre los actuales puntos kilométricos 15,4 y 32,9 [45].

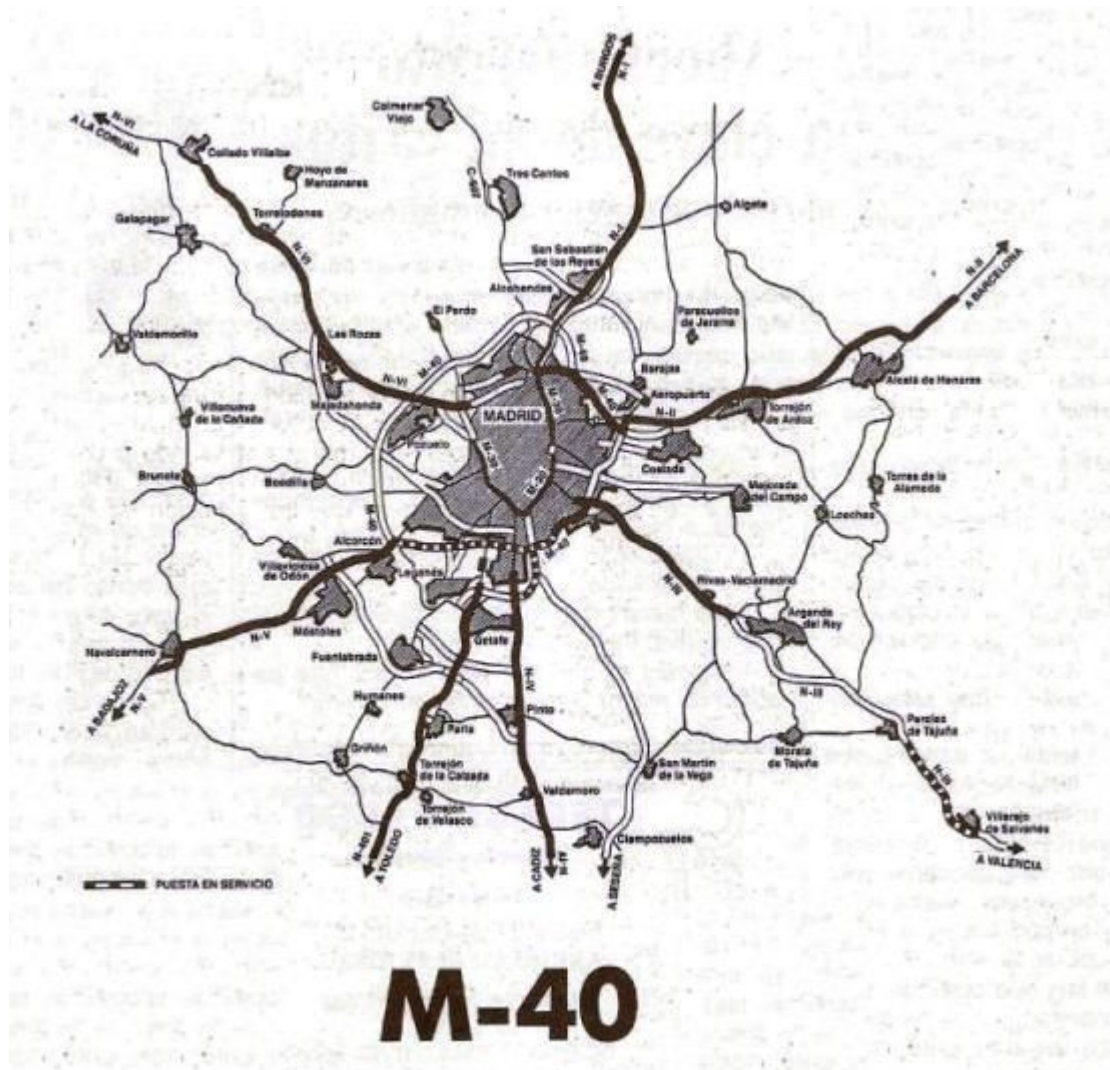


Figura 6: Tramos puestos en servicio en los accesos a Madrid el 29 de noviembre de 1990 [45].

El objeto de esta vía era facilitar la descongestión de la N-V, al proporcionar otras posibilidades de acceso al núcleo urbano de Madrid desde la misma. Este tramo quedó integrado en la autopista de circunvalación **M-40**, aunque con la apertura del Distribuidor Oeste en 1994 se disgregó del tronco el ramal de conexión con la carretera de Extremadura. Este ramal se encuentra actualmente bajo la denominación A-5/R.

Destaca también el denominado nudo Super Sur, en el punto kilométrico 12,2 de la N-IV (actuales p.k. 7 de la A-4 y 21 de la M-40) al constituir una alternativa al antiguo tramo existente de la carretera de Andalucía a su paso por Villaverde.

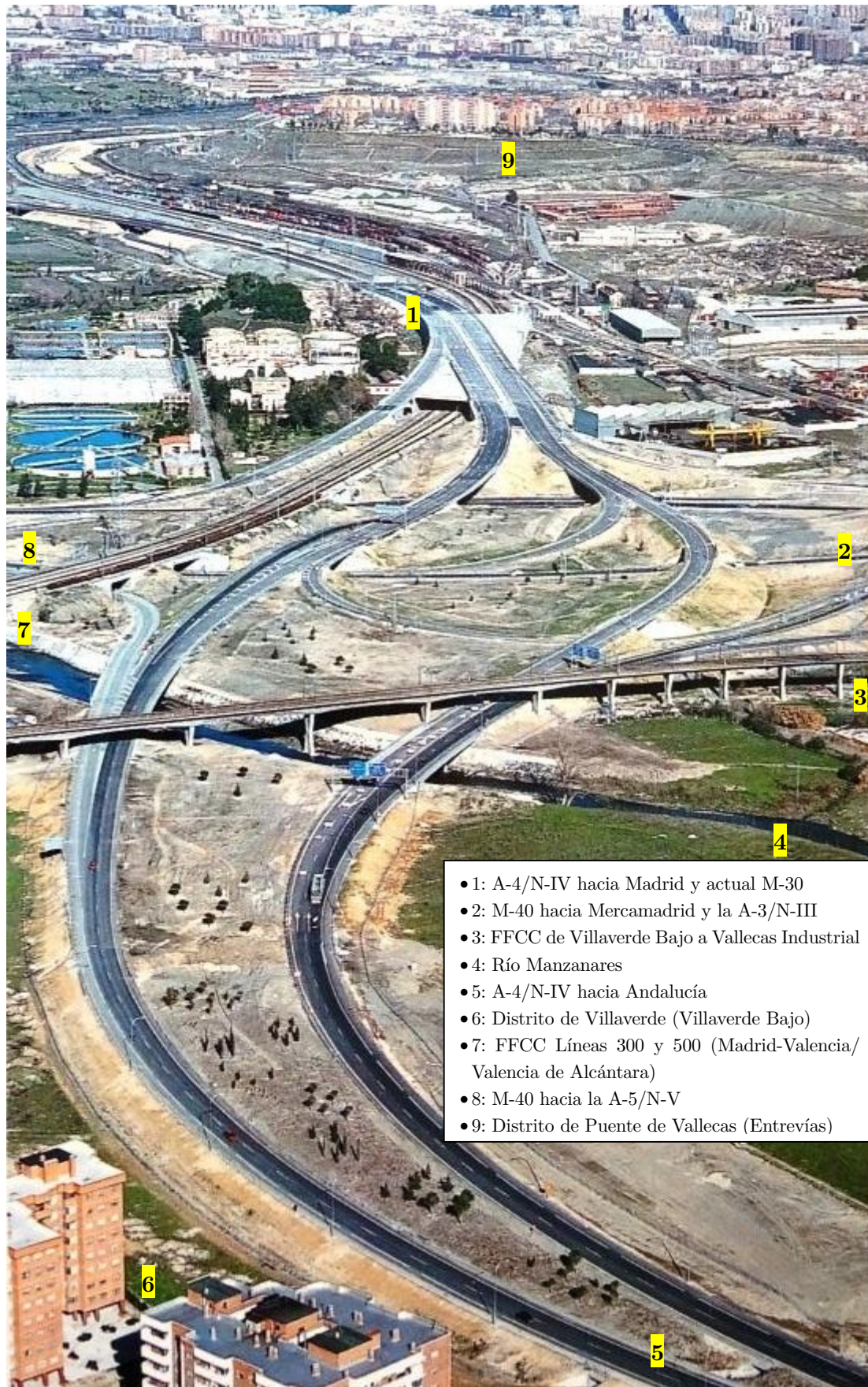


Figura 7: Vista aérea del nudo Super Sur desde el tramo sur del By-Pass de la N-IV en 1990 [45].

5.1.2 Situación actual

Tras la inauguración de todos los tramos pendientes para cerrar el anillo de la M-40, la autopista contaba con dos o tres carriles según el tramo. Tras las sucesivas obras que se han ido realizando a la autopista para aumentar su capacidad, la M-40 cuenta con al menos 3 carriles por sentido en cualquier tramo, mientras que en ciertos tramos puede contar con 4 carriles por sentido. Cada carril cuenta con una anchura de 3 metros y las calzadas con arcenes de 2,2 metros en el lado derecho de cada sentido. Además, **se ha establecido que la velocidad límite general de la M-40 sea de 100 km/h, salvo entre los puntos kilométricos 18,8 y 22,5, que es de 80 km/h.**

En lo que se refiere al tramo de estudio: el arco o distribuidor sur (p.k. 15,4 a 32,9), la M-40 cuenta con las salidas y entradas resumidas en una tabla con las siguientes características²:

- Nombre y número (Nº) de la salida
- PKD: Punto kilométrico de la divergencia, en el que se sitúa la salida
- CD: Característica de la divergencia, salida o bifurcación, la cual se representa de la forma $x\lambda y \rightarrow z$, siendo:
 - x: Número de carriles que continúan en la autopista tras la salida.
 - y: Número de carriles que se bifurcan de la autopista a la salida, pudiendo adoptar el valor ‘d’ si no existe bifurcación y la salida parte desde un carril de deceleración. Asimismo, si al valor numérico le acompaña un asterisco ‘*’, implica que procede de un carril de incorporación inferior a 500 m. a la salida.
 - z: El número de carriles en la salida, tras la bifurcación.
- VD: Velocidad límite en la salida, en km/h
- PKC: Punto kilométrico de la convergencia, en el que se sitúa la incorporación.
- CC: Característica de la convergencia, incorporación o confluencia, la cual se representa de la forma $x\lambda y \leftarrow z$, siendo:
 - x: Número de carriles que hay en la autopista antes de la incorporación.
 - y: Número de carriles que confluyen en la autopista a la salida, pudiendo adoptar el valor ‘a’ si no existe confluencia y la incorporación forma parte de un carril de aceleración que finaliza en una distancia superior a 100 metros, ‘c’ si el carril de aceleración es inferior a 100 metros y ‘s’ si se impone una señal de ‘STOP’. Asimismo, si al valor numérico le acompaña un asterisco ‘*’, implica que el carril de incorporación (solo uno) diverge a una salida situada a menos de 500 metros.
 - z: El número de carriles en la incorporación, previos a la confluencia.
- VC: Velocidad límite antes de llegar a la autopista o carril de aceleración, en km/h.

² Esta tabla sirve para resumir la complejidad que tienen las diferentes entradas y salidas a la M-40, las cuales pueden dar lugar a situaciones de tráfico conflictivas (incorporaciones abruptas, tráfico denso por el paso de 2 a 1 carriles de circulación...)

TABLA DE ENTRADAS Y SALIDAS EN EL SENTIDO HORARIO DE LA M-40 (Arco Sur)							
Nombre de la salida	Nº	SALIDA/divergencia			ENTRADA/converg.		
		PKD	CD	VD	PKC	CC	VC
M-30 Av. Mediterráneo, A-3 Valencia	15AB	15,4	3Yd→2	70	16,3	3λ1*←2	70
Av. Albufera	16	16,6	3Y1*→2	50	16,8	3λa←1	40
C/Embajadores, Vallecas, C.T.M. Mercamadrid	19A	18,2	4Yd→2	50	20,5	3λ1*←1	80
M-31, M-45, M-50, R-4 Córdoba	19B	18,5	3Y2→2	50	18,7	3λa←1	40
M-30	21A	20,9	3Y1*→1	60	21,4	3λc←2	60
A-4, R-4 Córdoba <i>Salida por la izquierda</i>	21B	21,3	3Yd→1	40	21,6	3λc←2	60
<i>Salida eliminada en el sentido horario</i>	<i>22</i>	<i>21,7</i>	-	-	22,1	3λ1*←1	80
Av. Córdoba, Andalucía. Hospital 12 de Octubre	23	22,2	3Y1*→2	70	23,0	3λc←1	80
Villaverde, Av. R. Ybarra	24	24,0	3Yd→2	70	-	-	-
A-42 Toledo, M-30 pza. F.Ladreda	25	24,4	3Yd→1	70	24,9	3λs←1	40
					25,3	3λ1←1	60
Leganés, Vía Lusitana, R-5 Toledo, Badajoz	27	26,1	3Y1→1	90	27,3	3λ1*←1	80
Leganés, Av. Carabanchel Alto	28	27,5	3Y1*→2	70	28,3	3λa←1	80
<i>Salida inexistente en el sentido horario</i>	-	-	-	-	29,0	3λ2←2	100
Bº de La Fortuna, Carabanchel, Cuatro Vientos	30	29,6	4Yd→2	50	31,2	3λc←1	80
A-5 Alcorcón, Badajoz, Madrid centro	31	30,4	3Y2→2	100	31,7	3λa←2	100
<i>Salida inexistente en el sentido horario</i>	<i>32</i>	-	-	-	32,7	3λa←1	70

Tabla 9: Entradas y salidas en el sentido horario de la M-40 (arco sur)



Figura 8: Imagen en satélite de la salida 23 y entrada 22 en sentido horario y salida 22 y entrada 23 en sentido antihorario. El carril de incorporación diverge a una salida en ambos casos. Además, la salida 23 (horario) pasa a 2 carriles [46].

TABLA DE ENTRADAS Y SALIDAS EN EL SENTIDO ANTIHORARIO DE LA M-40 (Arco Sur)							
Nombre de la salida	Nº	SALIDA/divergencia			ENTRADA/converg.		
		PKD	CD	VD	PKC	CC	VC
Alcorcón, S. José de Valderas	32	32,7	3Yd→1	70	32,5	3λa←1	40
A-5, Alcorcón, Badajoz, Madrid centro	31	31,4	3Yd→2	60	30,8	3λ2*←2	100
Carabanchel, Cuatro Vientos, Bº de La Fortuna	30	30,4	4Y1*→2	70	29,5	4λ1←1	80
M-45, R-5, A-42, Toledo, Badajoz	28B	28,6	4Y1→2	100	-	-	-
Leganés, Av. Carabanchel Alto	28A	28,3	3Y1→2	70	27,5	3λ1*←1	80
Vía Lusitana, M-425 Leganés	27	27,3	3Y1*→2	70	26,0	3λ1←1	80
A-42 Toledo	25B	25,5	3Y1→1	70	25,0	3λ1*←1	40
A-42 Pza. Fdez. Ladreda, M-30	25A	24,9	3Y1*→1	50	24,3	3λc←1	70
<i>Salida inexistente en el sentido antihorario</i>	<i>24</i>	-	-	-	24,0	3λc←1	80
Av. Córdoba, Andalucía. Hospital 12 de Octubre	23	23,0	3Yd→1	70	22,2	3λ1*←1	80
San Fermín, Villaverde Bajo	22	22,0	3Y1*→1	70	21,6	3λ1 ³ ←1	70
A-4, R-4 Córdoba	21B	21,5	4 ⁴ Y1→1	40	21,1	3λ1*←1	60
M-30 <i>Salida por la izquierda</i>	21A	21,5	3Y1→2	40			40
C/Embajadores, Vallecas, C.T.M. Mercamadrid	20	21,0	3Y1*→2	80	17,8	3λa←1	80
M-31, M-45, M-50, R-4 Córdoba	19	19,0	3Yd→1	40	18,6	3λ1←2	70
Av. Albufera	16	16,8	3Yd→1	50	16,6	3λ1*←1	70
A-3 Valencia	15B	16,2	4 ⁵ Yd→2	70	15,4	3λa←1	70
M-30 Av. Mediterráneo	15A	16,2	3Y1*→2	50	15,4	3λa←1	80

Tabla 10: Entradas y salidas en el sentido antihorario de la M-40 (arco sur)

Tras una primera observación a las características de las entradas y salidas del arco sur de la M-40, podría decirse que existen numerosos puntos conflictivos, por contar con carriles de aceleración y de deceleración muy cortos que entorpecerían el tráfico, así como embotellamientos por el paso de 2 carriles a un solo carril de aceleración a la misma autopista o a la inversa, de carriles de deceleración en salidas muy transitadas a 2 carriles tras salir de la M-40.

³ Se impide el acceso hacia la salida 21A desde la entrada 22.

⁴ El carril izquierdo diverge en la salida 21A.

⁵ El carril derecho diverge en la salida 15A.

5.1.3 Plano del área de estudio

El recorrido abarca un total de 77,21 km, considerando la inclusión de segmentos pertenecientes a las vías A-5R, A-42 y A-4, así como la totalidad de las salidas y entradas desde la 15 hasta la 32. El número total de secciones es de 174, mientras que las intersecciones ascienden a 95.

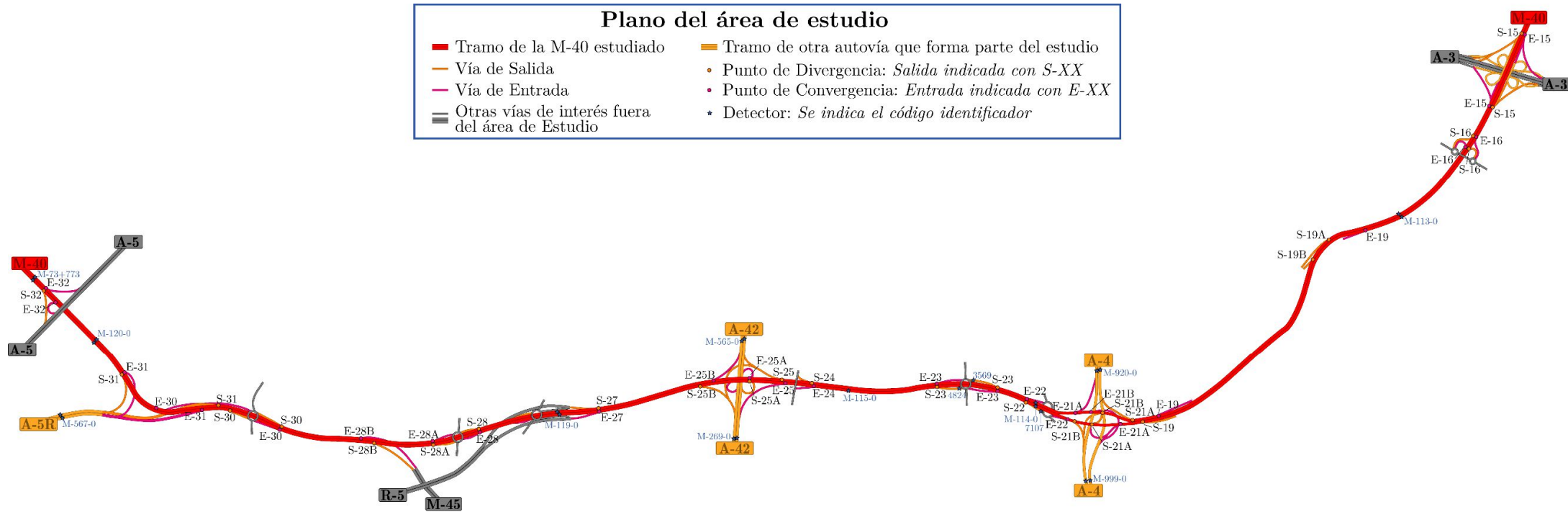


Figura 9: Plano general del área de estudio. Elaboración propia



Figura 10: Plano actual de la M-40 [47]

5.2 Datos del tráfico en la M-40

Para la toma de datos del tráfico, se usarán los ofrecidos por el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible [48] y del Ayuntamiento de Madrid [49]:

- Las estaciones del Ministerio en el tramo estudiado (fijas) disponen, en cada carril, de una doble espira embutida en el firme y conectada con un aparato registrador que detecta el número de vehículos que pasan, su velocidad y su longitud, lo que permite diferenciarlos en vehículos ligeros (longitud 6 m) [50]. Los datos que se tomarán serán los porcentajes horarios (según el IMD o índice medio diario) para un día laborable [48] de todo 2022.
- Los puntos de medida del Ayuntamiento de Madrid son los correspondientes a vías rápidas y acceso a la ciudad y algunos con sistemas básicos de control de semáforos. Ofrecen datos en franjas de 15 minutos con el número exacto de vehículos por hora que pasan por cada punto de medida. Los datos que se tomarán será la media de los días laborables (lunes a viernes) del primer cuatrimestre de 2025.

En ambos casos, se tomarán los datos de la hora punta (de 8:00 a 9:00) y de la hora valle (de 11:00 a 12:00) para los días laborables. Las simulaciones se harán únicamente en estas 2 franjas horarias mencionadas, todo ello con el objetivo de averiguar cualquier situación de conflicto y de saturación que se pueda dar, tanto en la hora con mayor afluencia como en aquella con una situación de tráfico más relajada.

CAPÍTULO 5: ÁREA DE ESTUDIO Y SU PARQUE MOTOR

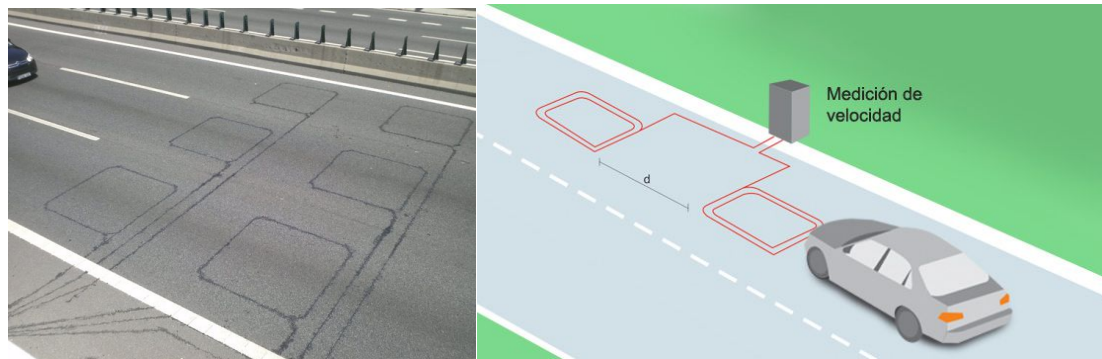


Figura 11: Las Espiras inductivas se usan para medir la velocidad, la longitud y el número de los vehículos que circulan en cada carril [51]

Los datos obtenidos del Ministerio de Transportes [48] y del Ayuntamiento de Madrid [49] se resumen en la siguiente tabla:

TABLA DE DATOS DE TRÁFICO			
Identificador	Ubicación	Media h. punta	Media h. valle
3569	M-40 Salida H23	1217	921
4824	M-40 Salida A23	823	770
7107	M-40 Salida A22	367	383
M-120-0H	Calzada 1 (Horario), P.K. 32	4264	3000
M-120-0A	Calzada 2 (Antihorario), P.K. 32	3958	2609
M-567-0A	Calzada 1 hacia Alcorcón A5R P.K. 1,6	3591	3411
M-567-0M	Calzada 2 hacia M40 A5R P.K. 1,6	4724	3853
M-119-0H	Calzada 1 (Horario), P.K. 26,64	3846	3402
M-119-0A	Calzada 2 (Antihorario), P.K. 26,64	3573	3331
M-115-0A	Calzada 2 (Antihorario), P.K. 23,85	5390	5299
M-114-0H	Calzada 1 (Horario) P.K. 21,99	4400	4040
M-114-0A	Calzada 2 (Antihorario) P.K. 21,99	4884	4617
M-113-0	M-40 P.K. 17,5	Sin datos	Sin datos
M-73+773	Calzada 1 (Horario) P.K. 36,9	5645	3330
M-73-0A	Calzada 2 (Antihorario) PK36,9	3807	2915
M-565-0T	Calzada 1 A-42 hacia Toledo P.K. 5,81	4367	3754
M-565-0M	Calzada 2 A-42 hacia Madrid P.K. 5,81	4763	3541
M-269-0T	Calzada 1 A-42 hacia Toledo P.K. 7,64	4387	3949
M-269-0M	Calzada 2 A-42 hacia Madrid P.K. 7,64	3979	3261
M-920-0S	Calzada 1 A-4 hacia SUR P.K. 5,44	4164	3613
M-920-0M	Calzada 2 A-4 hacia Madrid P.K. 5,44	5109	3941
M-999-0S	Calzada 1 A-4 hacia SUR P.K. 8,52	3241	2916
M-999-0M	Calzada 2 A-4 hacia Madrid P.K. 8,52	2808	2735

Tabla 11: Datos de tráfico. Se indica el total de vehículos que han circulado en una franja horaria (punta/valle) de un día laborable

5.3 Parque motor de vehículos

5.3.1 Parque actual de vehículos en España

Comenzando por el tipo de motor, se muestran los datos del parque de vehículos en España actualizado a 1 de enero de 2023 según los datos proporcionados por la DGT (Dirección General de Tráfico), en función del tipo de vehículo y de su motor [52]:

Tipo vehículo	Gasolina	Diesel	Otros	TOTAL
Turismo	11.943.476	13.105.719	307.399	25.356.594
Camión	77.861	2.371.849	17.288	2.466.998
Furgoneta	418.519	2.231.270	31.444	2.681.233
Autobús	208	60.861	5.569	66.638
Motocicleta	4.107.788	5.955	49.107	4.162.850
Tractor industrial	0	253.334	0	253.334
Otros	131.647	386.723	28.314	546.684
TOTAL	16.679.499	18.415.711	439.121	35.534.331

Tabla 12: Parque de vehículos en España en 2023 [52]

Se muestran también los datos en función de su etiqueta medioambiental:

Tipo vehículo	A	B	C	ECO	CERO
Turismo	6.602.174	7.663.467	9.473.523	1.305.641	311.789
Motocicleta	1.185.775	507.800	2.419.947	1.288	48.040

Tabla 13: Parque de vehículos en España en 2023 según etiqueta medioambiental [52]

Los distintivos ambientales fueron creados en función del impacto medioambiental de los vehículos y son los siguientes, ordenados de mayor a menor eficiencia [53]:

- **CERO:** Identifica a los vehículos más eficientes. Tendrán derecho a esta etiqueta eléctricos de batería (BEV), eléctricos de autonomía extendida (REEV), eléctricos híbridos enchufables (PHEV) con una autonomía de 40 km o vehículos de pila de combustible. **Representan al 1,2% del total de los vehículos.**
- **ECO:** Vehículos híbridos, gas o ambos. Tendrán derecho a esta etiqueta eléctricos enchufables con autonomía inferior a 40 km, híbridos no enchufables (HEV), vehículos propulsados por gas natural y gas (GNC y GNL) o gas licuado del petróleo (GLP). Deben cumplir los criterios de la etiqueta C. **Representan al 4,5% del total de los vehículos.**
- **C:** Vehículos de combustión interna que cumplen con las últimas emisiones EURO. Tendrán derecho a esta etiqueta turismos y furgonetas ligeras de gasolina matriculadas a partir de enero de 2006 y diésel a partir de septiembre de 2015. Vehículos de más de 8 plazas, excluido el conductor, y pesados tanto de gasolina como diésel, matriculados desde 2014. **Representan al 35,1% del total de los vehículos.**

CAPÍTULO 5: ÁREA DE ESTUDIO Y SU PARQUE MOTOR

- **B:** Vehículos de combustión interna que, si bien no cumplen con las últimas especificaciones de las emisiones EURO, sí que lo hacen con anteriores. Tendrán derecho a esta etiqueta turismos y furgonetas ligeras de gasolina matriculadas desde el 1 de enero de 2001 y diésel a partir de 2006. Vehículos de más de 8 plazas y pesados tanto de gasolina como diésel, matriculados desde 2006. **Representan al 29,8% del total de los vehículos.**
- **A:** El resto de los vehículos, el 50% más contaminante, no tiene derecho a ningún tipo de distintivo al no cumplir los requisitos para ser etiquetado como vehículo limpio. **Representan al 29,4% del total de los vehículos.**

Finalmente, clasificando los vehículos según su nivel de automatización, la gran mayoría se encuentra entre los niveles 0 y 1 [16]:

- **Nivel 0:** ~60% (vehículos >10 años, sin ADAS o con sistemas básicos como ABS).
- **Nivel 1:** ~30% (vehículos con control de crucero adaptativo, frenado de emergencia, etc., obligatorios desde 2022 en nuevas homologaciones) [54].
- **Nivel 2:** ~10% (vehículos recientes con ADAS avanzados, ej., asistente de carril + control de velocidad inteligente).
- **Nivel 3-5:** <0,1% (proyectos piloto, pruebas de vehículos autónomos en entornos controlados...).

Es necesario recalcar que, desde julio de 2022, la UE obliga a incorporar ocho sistemas ADAS en vehículos nuevos (nivel 1-2), como frenado de emergencia, asistente de velocidad inteligente y alerta de cambio de carril [55]. Por parte de la DGT, se impulsan normativas para vehículos automatizados (homologación y circulación) y colabora en proyectos como DGT 3.0 [56] y V2X con 5G para mejorar la conectividad. También existen proyectos piloto que preparan la infraestructura para niveles 3-4, con avances significativos previstos para 2026 [57].

5.3.2 Evolución del parque de vehículos en España

El primer dato llamativo del parque motor español es su creciente envejecimiento, según se puede observar en la siguiente gráfica:

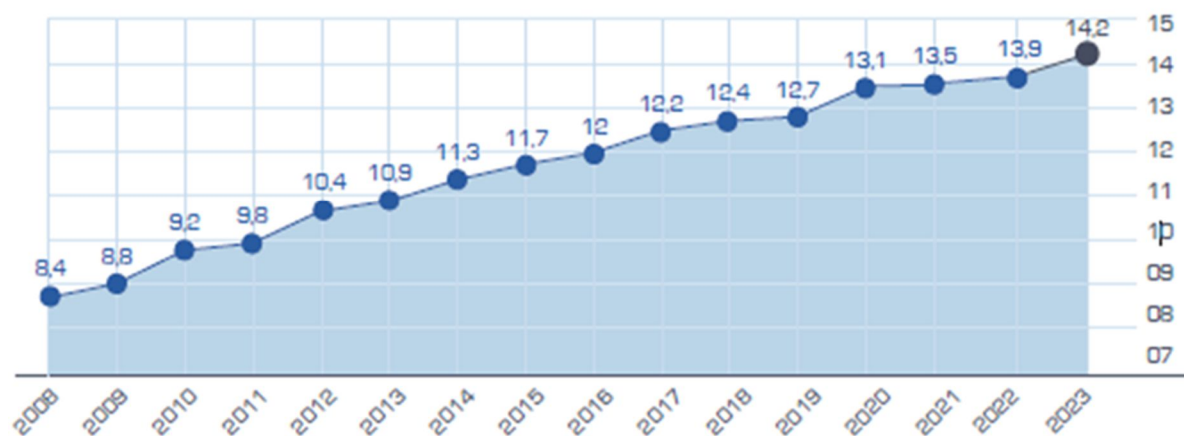


Figura 12: Evolución de la edad media del parque de turismos en España [58]

Además, la evolución del parque nacional de vehículos, por tipo de carburante, muestra un lento crecimiento de los vehículos eléctricos e híbridos, aunque es mayor si se compara con vehículos diésel/gasolina en cuanto a nuevas matriculaciones:

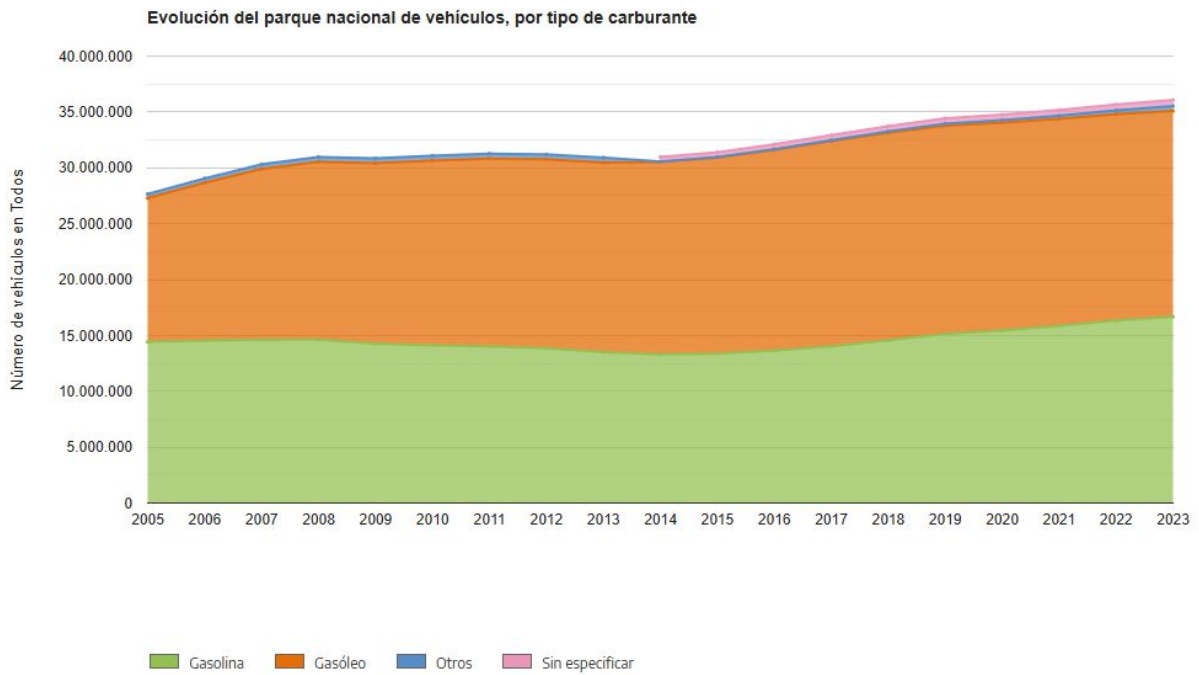


Figura 13: Evolución del parque nacional de vehículos, por tipo de carburante [59]

Por lo tanto, se muestra una tendencia creciente en matriculaciones de vehículos eléctricos, híbridos y de GLP (17,8% en 2020 a 46,7% en 2023) en comparación a vehículos diésel (70% en 2010 a 12,5% en 2023) y de gasolina (56,6% en 2018 a 40,8% en 2023). Sin embargo, el fuerte envejecimiento del parque de turismos en España está retrasando la transición a tecnologías nuevas. Del mismo modo, se puede visualizar el porcentaje de vehículos del parque motor español según normativas EURO en el siguiente gráfico:

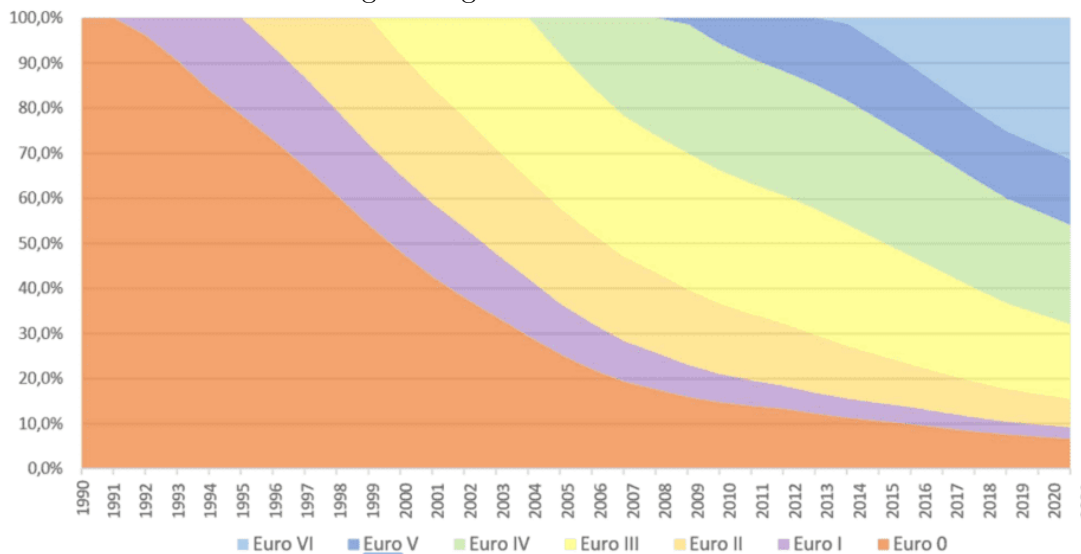


Figura 14: Evolución en % del parque de turismos según normativas EURO [60]

CAPÍTULO 5: ÁREA DE ESTUDIO Y SU PARQUE MOTOR

“Al final del año 2021, sólo un **31,6%** de los turismos del parque cumplen la EURO VI, mientras que el resto (68,4%) corresponden a las anteriores normativas o son pre-EURO (EURO 0). En detalle, 14,5% cumplen la EURO V, 22% la EURO IV[...] se ha estimado que, a finales de 2021, un 14,9% de los turismos cumplen la EURO III, un 5% la EURO II, un 3% la EURO I y un 9% no cumplen normativa EURO (EURO 0)” [60].

AIMSUN obliga a indicar los porcentajes de emisión estándar para cada vehículo si se quiere realizar el modelo de emisiones tanto del modelo de Londres como en el de COPERT salvo para los vehículos eléctricos. Sin embargo, no ofrece la posibilidad de incluir nuevas normas, como la EURO 7, ya vigente desde el 1 de julio de 2025 para turismos y furgonetas [61], ni cualquier otra futura. Se establecen los siguientes porcentajes para cada tipo de vehículo:

Porcentaje de Vehículos que cumplen Normativas EURO							
	EURO 0	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5	EURO 6
Nivel 0	50%	15%	35%	0%	0%	0%	0%
Nivel 1	9%	3%	5%	14,9%	22%	14,5%	31,6%
Nivel 2 D	0%	0%	0%	10%	35%	50%	5%
Nivel 2 G	0%	0%	0%	0%	10%	40%	50%
Nivel 3	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

Tabla 14: Porcentaje de vehículos por nivel de automatización que cumplen normativas EURO

Solamente para el nivel 2 se establece un porcentaje distinto entre vehículos con motor diésel (D) y de gasolina (G). Esta norma no aplica a vehículos de nivel 4/5 al ser todos eléctricos.

5.3.3 Previsión del parque de vehículos en España según el motor

Resulta ciertamente complicado realizar una proyección a futuro del parque móvil en España debido a que se tienen que considerar múltiples factores como políticas públicas, avances tecnológicos, infraestructura de recarga, comportamiento del consumidor y normativas europeas, como la prohibición de venta de vehículos de combustión en 2035 (salvo aquellos que usen combustibles sintéticos) [62]. Esto reducirá drásticamente las matriculaciones de diésel y gasolina, pero los vehículos existentes seguirán circulando hasta 2050, cuando se prohíbe su uso.

Dado que no existen estadísticas oficiales que ofrezcan proyecciones exactas para este periodo, la siguiente estimación se basa en datos actuales, tendencias recientes y proyecciones de fuentes fiables, ajustadas con un análisis crítico de las dinámicas del mercado:

Proyección porcentual del parque de vehículos español por motor						
AÑO	DIÉSEL	GASOLINA	GLP	ELÉCTRICOS	HÍBRIDOS ⁶	OTROS ⁷
2025	50%	40%	0,5%	1%	8%	0,5%
2030	45%	35%	1%	5%	13%	1%
2035	35%	30%	1,5%	10%	22%	1,5%
2040	20%	20%	2%	25%	30%	3%
2045	10%	10%	2%	40%	35%	3%
2050	2%	2%	1%	60%	30%	5%

Tabla 14: Proyección porcentual del parque automovilístico español por tipo de motor entre 2025 y 2050

Justificación de la proyección:

- **2025-2030:** El diésel y la gasolina siguen dominando debido al parque envejecido (14,5 años de media). Los eléctricos crecen lentamente (de 0,3% a 5%) por el objetivo de 5 millones en 2030, pero no se cumplirá (probable ~1-2 millones). Los híbridos ganan cuota (8-13%) por su versatilidad y etiqueta ECO. El GLP crece marginalmente por su bajo coste, pero no supera el 1%.
- **2035:** La prohibición de matriculaciones de combustión reduce diésel y gasolina a ~35% y 30%, respectivamente, pero persisten por la longevidad de los vehículos existentes. Los eléctricos alcanzan el 10% con una red de recarga más desarrollada. Los híbridos, especialmente PHEV, llegan al 22% como opción de transición.
- **2040-2045:** La renovación acelera la caída de diésel y gasolina (20% y 10%). Los eléctricos crecen significativamente (25-40%) por economías de escala, baterías más baratas y ZBE estrictas. Los híbridos alcanzan su pico (~30-35%) antes de declinar frente a los eléctricos puros. El GLP se estabiliza en ~2% por su nicho.
- **2050:** La prohibición de circulación de combustión reduce diésel y gasolina a ~2% (vehículos históricos y adaptados a combustibles sintéticos). Los eléctricos dominan (60%) por la normativa y la infraestructura consolidada. Los híbridos (30%) persisten en zonas rurales o por limitaciones de recarga. El GLP cae al 1% frente a los eléctricos.
- **De 2050 en adelante:** Se presupondrá que la electrificación seguirá creciendo hasta alcanzar prácticamente el 100%. Asimismo, se alcanzará cuando el 100% de los vehículos estén en el nivel más alto de automatización.

Aun así, existen demasiadas incertidumbres y limitaciones que podrían cambiar por completo esta proyección. Por ejemplo, la matriculación de vehículos eléctricos depende de la infraestructura de recarga, la cual es actualmente insuficiente (solo unos 50000 puntos públicos

⁶ Híbridos: Incluye Híbridos enchufables (PHEV) y no enchufables (HEV).

⁷ Otros: Incluye GNC, GNL, hidrógeno y combustibles sintéticos.

en 2024, de los cuales el 22,8% no está operativo [63]) y del abaratamiento de baterías. Si no se cumplen los objetivos, los híbridos y el GLP podrían mantener una cuota mayor. Asimismo, los combustibles sintéticos podrían prolongar la vida de los vehículos diésel y gasolina más allá de 2035. Por otro lado, la preferencia de los vehículos usados (de segunda mano), que son del 1,4 por cada vehículo nuevo, la creciente inflación y reducción del poder adquisitivo de la población española limitarían la electrificación.

5.3.4 Previsión del parque de vehículos en España según el nivel de automatización

Realizando una proyección basada en avances tecnológicos, pruebas de prototipos y la inversión en fabricantes, la automatización total se podría conseguir entre los años 2050 y 2060 [14], si bien este sería el caso más optimista, ya que resulta necesario una fuerte reducción de los costes y la alta satisfacción del consumidor [64]. Todo ello sería gracias a mejoras en IA, sensores LIDAR, radar y conectividad V2X.

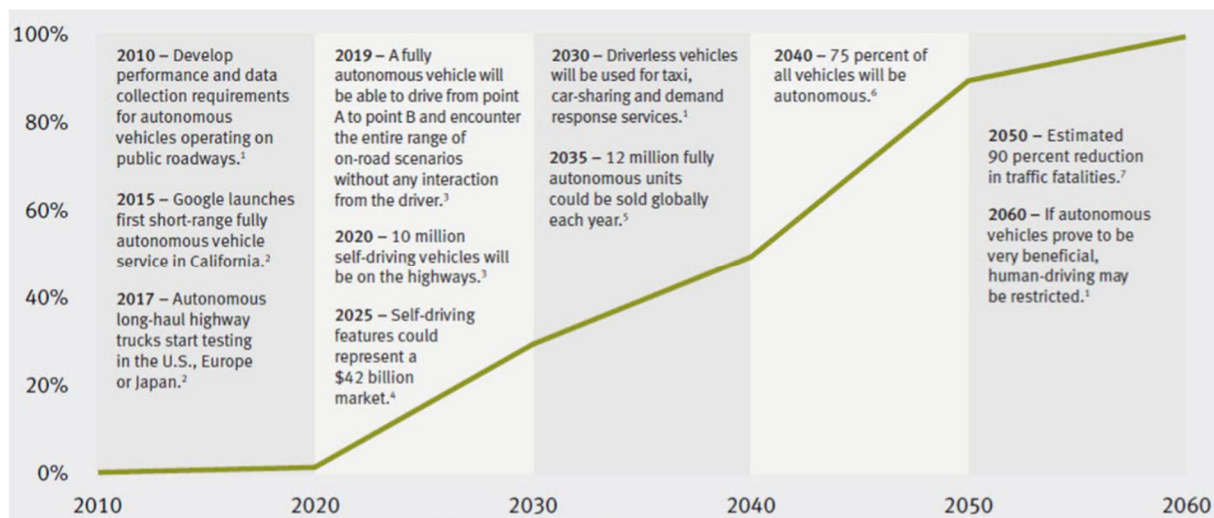


Figura 15: Desarrollo previsto de los vehículos autónomos [14]

Otros estudios indican que el más alto nivel de automatización no tendrá ninguna representación en el año 2035 y que en dicho año solo habrá un 6% de ventas de vehículos de nivel 4 [65] o que casi todos los vehículos serían autónomos en 2050 o 2070 en escenarios optimistas [64]. Aun así, estas proyecciones no son específicas para España y asumen una renovación más rápida del parque que la observada en el contexto español. Es por ello por lo que se realizan los siguientes supuestos:

- **Regulaciones:** a UE prohíbe la venta de vehículos de combustión en 2035, impulsando la electrificación y la automatización (niveles 3-5 suelen estar en vehículos eléctricos). Se presupone (según la tendencia reguladora de la UE) que se exigirán niveles mínimos de automatización para nuevas matriculaciones justificando una mejoría de la seguridad vial.
- **Avances tecnológicos:** Los niveles 3 y 4 estarían disponibles comercialmente en 2030/35, inicialmente en entornos controlados (autopistas, ciudades inteligentes). Para dichos años la red 5G cubriría la totalidad del país. Los costes de los diferentes sensores disminuirían

significativamente cerca del 2040, acercando el nivel 4, año en el que comenzarían a circular vehículos de dicho nivel. La adopción masiva del nivel 5 comenzaría en 2050.

Proyección porcentual del parque de vehículos español por nivel de automatización					
AÑO	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4/5
2025	55%	30%	15%	0%	0%
2030	45%	30%	20%	5%	0%
2035	35%	25%	25%	15%	0%
2040	20%	20%	25%	20%	15%
2045	10%	15%	20%	25%	30%
2050	5%	10%	15%	25%	45%
2055	2%	5%	10%	20%	63%
2060	1%	2%	5%	15%	77%
2065	0%	1%	2%	10%	87%
2070	0%	0%	1%	5%	94%
2075	0%	0%	0%	0%	100%

Tabla 15: Proyección porcentual del parque automovilístico español por nivel de automatización entre 2025 y 2075

CAPÍTULO 6: ESCENARIOS A EVALUAR

6.1 Escenarios y replicaciones

6.1.1 Escenarios propuestos

Los escenarios siguientes representarían las situaciones intermedias desde las que se comienzan a introducir los primeros vehículos con bajo nivel de automatización, hasta aquellos con niveles más altos, dejando sin uso aquellos vehículos con los niveles más bajos.

Se proponen los siguientes escenarios:

Porcentaje de vehículos de cada nivel de automatización					
ESCENARIO	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4/5
A (2000)	100%	0%	0%	0%	0%
B (2025)	55%	30%	15%	0%	0%
C (2030)	45%	30%	20%	5%	0%
D (2035)	35%	25%	25%	15%	0%
E (2040)	20%	20%	25%	20%	15%
F (2050)	5%	10%	15%	25%	45%
G (2065)	0%	1%	2%	10%	87%
H (2075)	0%	0%	0%	0%	100%

Tabla 16: Escenarios propuestos

Tal y como se ha mencionado anteriormente, cada escenario se replicará tanto en la hora punta como en la hora valle. Además, en los escenarios E, F, G y H, al circular vehículos de nivel 4/5, se simularán por un lado con CACC activado y por otro con el CACC desactivado para poder evaluar las diferencias y sus efectos en la circulación.

6.1.2 Desglose de vehículos

En todos los escenarios se incluirá únicamente las dos clases de vehículos mencionadas durante la metodología en una proporción fija, que solo cambiará en función de su nivel de automatización y tipo de motor:

- **Vehículos estándar de pasajeros (coches):** La proporción será del 94,5%.
- **Vehículos pesados (camiones):** La proporción será del 5,5%.

Este cálculo se ha realizado utilizando la media de todos los datos obtenidos de los registros de tráfico.

Una vez vista la proyección del parque motor y para tener un análisis de emisiones lo más realista posible dadas las limitaciones del programa AIMSUN, el porcentaje de vehículos según su motor se clasificará solo en 4 motores (los permitidos por AIMSUN), los cuales serán diésel, gasolina, GLP y eléctricos. Los vehículos híbridos enchufables entrarán dentro de la categoría de eléctricos

y aquellos clasificados como ‘otros’ serán despreciados. Para facilitar la entrada de datos sobre vehículos en cada escenario en AIMSUN, se simplificará de tal forma que, en cada nivel, los 4 motores distintos mencionados sumen el 100%.

Distribución de vehículos a introducir en AIMSUN					
Motor	Nivel 0	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4/5
Diésel	45%	50%	30%	15%	0%
Gasolina	54%	41%	30%	15%	0%
GLP	1%	1%	1%	0%	0%
Eléctricos	0%	8%	39%	70%	100%

Tabla 17: Tipos de vehículos que se introducirán en el programa AIMSUN

6.1.3 Replicaciones

Como se ha mencionado anteriormente, estos escenarios se simularán tanto en las horas punta de los días laborables (de 8:00 a 9:00) como en las horas valle (de 11:00 a 12:00) en franjas horarias de 1 hora de duración. Será necesario replicar cada escenario en cada franja horaria un determinado número de veces para obtener al menos un nivel del intervalo de confianza ‘deseable’, de al menos un 95%. Se demostró que en estudios de microsimulaciones [66] se requiere el siguiente número de replicaciones en función del intervalo deseado y del TTC:

Umbral del TTC	ε : Error (%)	N: N ^o min de replicaciones
TTC < 1,5	5	59
TTC < 1,5	10	15
TTC < 0,5	5	196
TTC < 0,5	10	49

Tabla 18: Número mínimo requerido de replicaciones [66]

Dicho número se calculó siguiendo la siguiente ecuación [66]:

$$N = \left(\frac{\sigma \cdot t_{(1-\frac{\alpha}{2}), N-1}}{\varepsilon \cdot \mu} \right)^2$$

Donde N es el n^o de réplicas, σ es la desviación estándar, t representa la t -student, ε es el error especificado como fracción de la media y μ es la media del número de conflictos simulados a partir del conjunto inicial de simulaciones realizadas

Finalmente, el número mínimo de replicaciones para cada escenario y franja horaria será de 15. Se demostró que este número fue suficiente en todos los escenarios [6], donde se tomó, en el escenario H (todos los vehículos de nivel 4/5) unos valores de $\sigma=28,06$, $t=2,14$ con $\alpha=0,05$, $\varepsilon=0,1$ y $\mu=305$. Las 15 replicaciones podrían incluso seguir siendo suficientes con un valor de $\varepsilon=0,05$.

6.2 Evaluación de los resultados

6.2.1 Evaluación de la seguridad

La evaluación de la seguridad de los VAC típicamente se ha dividido en dos categorías [67]:

1. Analizar la dinámica y el comportamiento del tráfico entre su trayectoria, mostrando la agresividad y las interacciones entre los vehículos durante la simulación.
2. Analizar las trayectorias de los vehículos para extraer los posibles conflictos creados.

Para evaluar la seguridad vial y los conflictos generados durante las simulaciones, es necesario activar el SSAM. Los vehículos tendrán una situación de solapamiento (un conflicto) si mantienen la misma velocidad y proyección hasta los **umbrales TTC y PET** [67].

Esta estimación se basa en la ubicación actual (x), la velocidad (v), la longitud (l) y la trayectoria futura de dos vehículos ($i-1$ el vehículo delantero, i el que le sigue) en un instante (t) dado. **Se define un valor TTC** para cada paso temporal durante el evento de conflicto. El conflicto finaliza cuando el valor TTC vuelve a superar el umbral crítico. Este valor se registra en segundos.

$$TTC_i(t) = \begin{cases} \frac{x_{i-1}(t) - x_i(t) - l_{i-1}(t)}{v_i(t) - v_{i-1}(t)} & : v_i(t) > v_{i-1}(t) \\ \infty & : v_i(t) \leq v_{i-1}(t) \end{cases}$$

«PET» es el tiempo mínimo posterior a la invasión observado durante el conflicto. El tiempo posterior al acercamiento es el tiempo transcurrido entre la última vez que el primer vehículo ocupó una posición y el momento en que el segundo vehículo llegó posteriormente a la misma posición. Un valor cero indica una colisión, ya que un PET menor implica mayor riesgo de colisión. Se asocia un tiempo posterior a la aproximación a cada paso temporal durante un conflicto. Un evento de conflicto se da por concluido cuando se registra el valor final de PET en la última posición en la que el valor del tiempo hasta la colisión seguía estando por debajo del valor del umbral crítico.

$$PET(\text{veh1}, \text{veh2}) = t_{\text{entrada}}(\text{veh2}) - t_{\text{salida}}(\text{veh1})$$

Se usará un PET predeterminado de 5 segundos, el mismo que se ha usado en múltiples estudios de simulaciones en seguridad vial. Del mismo modo, se dejarán iguales los valores del rear end angle (ángulo trasero) a 30° y del crossing angle (ángulo de cruce) a 80°. Es necesario recalcar que es necesario hacer uso de un programa externo a Aimsun (SSAM) para poder obtener el análisis de seguridad.

Siguiendo el concepto recogido en la bibliografía de que unos tiempos de reacción más rápidos de los VAC podrían aumentar su capacidad para disminuir significativamente el umbral de TTC [32][25][30], los umbrales que se usarán dependerán **exclusivamente** del vehículo seguidor y no del vehículo seguido:

- TTC=1,5s para los vehículos seguidores que implican la intervención directa del conductor, es decir, para los vehículos de niveles 0, 1 y 2.
- TTC=0,75s para los vehículos seguidores que NO implican la intervención directa del conductor, es decir, para los vehículos de niveles 3, 4 y 5.

Sin embargo, a modo de simplificación, se usará un $TTC=1,5s$ en todos los casos, tras realizar un análisis de sensibilidad [27]: el número de replicaciones será menor y se siguen obteniendo resultados satisfactorios. Y es que además el programa que analiza los archivos .trj que genera la API SSAM de Aimsun, no permite distinción alguna entre los diferentes tipos de vehículos.

6.2.2 Evaluación de los parámetros de emisiones

Aimsun devuelve hasta 5 tipos de contaminantes tras finalizar las simulaciones: CO, CO₂, NO_x, PM₁₀ y VOC con la ayuda de 3 modelos distintos: Panis, COPERT y London. El programa no admite simular al mismo tiempo los modelos de COPERT y London, de modo que es necesario realizar una simulación para cada modelo. También es necesario realizar dos series distintas de simulaciones:

- Una serie con los datos del parque motor y de las previsiones estimadas definidos en el apartado 5.3 y 6.1. Esta serie indicará una caída de las emisiones entre los distintos escenarios.
- Otra serie donde todos los vehículos solo se diferencien por su nivel de automatización y todos tengan la misma clase de motor. Concretamente, todos los escenarios tendrán el mismo motor que en el escenario A. Esta serie indicará una caída de emisiones entre los distintos escenarios que depende solamente de la automatización de sus vehículos.

6.2.3 Evaluación del resto de parámetros

El resto de los parámetros, entre ellos los datos de tiempos de demora y la velocidad media los devuelve el programa Aimsun al terminar la simulación. No será necesario realizar un análisis tan exhaustivo como en el caso de la seguridad vial.

CAPÍTULO 7: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRÁFICO

7.1 Calibración

Para garantizar la máxima verosimilitud del modelo de microsimulación, es necesario alcanzar los siguientes objetivos de calibración:

- 1. Que el comportamiento de cada vehículo, según su nivel de automatización, se asemeje a la realidad.**

Para alcanzar la primera meta planteada, se ha realizado una recalibración de todos los parámetros en AIMSUN, siguiendo las directrices proporcionadas en el apartado 3.4.

- 2. Ajustar los datos del tráfico de la microsimulación para que, al pasar por los detectores, muestren los mismos datos que en la realidad**

En primer lugar, se colocarán detectores en las mismas ubicaciones indicadas por el Ministerio de Transportes y por el Ayuntamiento de Madrid. Estos detectores deberán mostrar el mismo número que el dato medio de la franja horaria estudiada de un día laborable. Dichos datos se encuentran en el apartado 5.2. En segundo lugar, antes de iniciar la microsimulación, será necesario ajustar dos parámetros:

- Los datos de demanda, los cuales se introducirán dentro de los estados de tráfico para acercarse a los datos que deben mostrar los detectores. *Ver más detalles en el Anexo A.*
- El porcentaje de vehículos de cada clase del año en el que se obtuvieron los datos del tráfico (2022-25).

- 3. Que la microsimulación se desenvuelva de manera fluida en todas las secciones del tramo sujeto a estudio.**

Para ello, se implementarán modificaciones en los parámetros de las secciones que presentan un mayor nivel de conflictividad, tales como el incremento del porcentaje de cooperación y la optimización del intervalo de cooperación, fijándolo en un máximo de dos segundos. En el caso hipotético de que una incorporación evidenciara una congestión considerable, se implementaría un incremento en el porcentaje de agresividad y, como medida extrema, se activaría el cambio de carril imprudente.

A diferencia de las simulaciones en los distintos escenarios, las cuales se realizarán con una llegada de vehículos exponencial, la calibración se realizará con una llegada de vehículos constante. Además, **la calibración deberá hacerse con el escenario en el que todos los vehículos tengan nivel de automatización 0 (ESCENARIO A), tanto en la franja horaria de mayor demanda de tráfico (punta) como en la hora valle.**

7.2 Validación del modelo

Durante las primeras simulaciones se observaron múltiples retenciones en varias de las incorporaciones que disponen de un carril de aceleración a la M-40. En los modelos dinámicos de estas secciones, se modifican los siguientes parámetros en todas las incorporaciones que disponen de un carril de aceleración en todo el área de estudio:

- En el apartado Micro-Cambio de carril todos los parámetros se dejan por defecto (Cooperación al 80%, agresividad y cambio de carril imprudente anulados).
- En el apartado Meso-Carril Lateral, se modifica el Hueco de cooperación a 2 segundos.

Esta primera modificación solucionó la mitad de las retenciones que se producían en las incorporaciones con carril de aceleración. Sin embargo, todavía se seguían produciendo congestiones considerables en los siguientes puntos:

- En el sentido Antihorario:
 - Entrada 25A.
 - Entrada 24.
 - Entrada 15.
- En el sentido Horario:
 - Entrada 15.
 - Entrada 16.
 - Entrada 19.
 - Entrada 21A/B.
 - Entrada 23.
 - Entrada 31.
 - Entrada 32.
- Fuera de la M-40:
 - Incorporación a la A-42 en ambos sentidos
 - Incorporación a la A-4 en sentido sur.

Para estos casos, se realizaron las siguientes modificaciones:

- En el apartado Micro-Cambio de carril, la cooperación aumenta al 100%, la agresividad al 50% y se activa el cambio de carril imprudente.
- En el apartado Meso-Carril Lateral, se modifica el Hueco de cooperación a 2 segundos

Por último, para aquellos casos en los que se producían retenciones en incorporaciones en las que el carril de incorporación (solo uno) diverge a una salida situada a menos de 500 metros se realizó solamente la modificación del apartado Micro-Cambio de carril: la cooperación aumenta al 100%, la agresividad al 50% y se activa el cambio de carril imprudente. Esto solo fue necesario aplicarlo en los siguientes puntos:

- En el sentido antihorario, entre la entrada 22 y la salida 21.
- En el sentido horario, entre la entrada 22 y la salida 23.

Tras realizar todas las modificaciones indicadas, la circulación se resolvió de manera fluida durante toda la simulación. Los datos recogidos del tráfico en los detectores en la calibración del

CAPÍTULO 7: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRÁFICO

escenario A de las franjas horarias punta y valle (media de 15 replicaciones en cada caso) fueron los siguientes:

Identificador	HORA PUNTA			HORA VALLE		
	Datos	Resultados	Diferencia	Datos	Resultados	Diferencia
3569	1217	1232,93	1,31%	921	926,33	0,58%
4824	823	810,07	-1,57%	770	766,73	-0,42%
7107	367	384,8	4,85%	383	419,27	9,47%
M-120-0H	4264	4237,2	-0,63%	3000	3033	1,10%
M-120-0A	3958	3978,33	0,51%	2609	2652,13	1,65%
M-567-0A	3591	3565,6	-0,71%	3411	3422,53	0,34%
M-567-0M	4724	4672,2	-1,10%	3853	3886,07	0,86%
M-119-0H	3846	3798,6	-1,23%	3402	3418	0,47%
M-119-0A	3573	3539,8	-0,93%	3331	3378,33	1,42%
M-115-0A	5390	5373,67	-0,30%	5299	5318,27	0,36%
M-114-0H	4400	4402,67	0,06%	4040	4036,33	-0,09%
M-114-0A	4884	4854,33	-0,61%	4617	4600,93	-0,35%
M-73+773	5645	5617	-0,50%	3330	3356,4	0,79%
M-73-0A	3807	3643,4	-4,30%	2915	2813,47	-3,48%
M-565-0T	4367	4372	0,11%	3754	3746,07	-0,21%
M-565-0M	4763	4705,4	-1,21%	3541	3555,8	0,42%
M-269-0T	4387	4388,53	0,03%	3949	3939,13	-0,25%
M-269-0M	3979	3980,27	0,03%	3261	3258,73	-0,07%
M-920-0S	4164	4157,87	-0,15%	3613	3632,73	0,55%
M-920-0M	5109	4890,2	-4,28%	3941	3825,6	-2,93%
M-999-0S	3241	3322,33	2,51%	2916	2981,53	2,25%
M-999-0M	2808	2699,4	-3,87%	2735	2650,73	-3,08%
TOTAL	83307	82626,6	-0,82%	69591	69618,11	0,04%
DESVIACIÓN ESTÁNDAR			2,03%			2,49%

Tabla 19: Datos observados en los detectores tras las modificaciones en las calibraciones

Se observa una media de diferencias de un 0,82% por debajo de los datos reales, con una desviación estándar del 2,03% en el caso de la hora punta, mientras que la hora valle tiene una media de diferencias de solo el 0,04% por encima de los datos reales, pero con una desviación estándar del 2,49%.

Con estos resultados, se podría dar por validado el modelo. No obstante, a modo de refuerzo, se puede visualizar que los resultados de aforo y contaje (Apartado 8.1.1) se mantienen constantes en todos los escenarios.

CAPÍTULO 8: RESULTADOS

Este capítulo se divide en dos apartados, donde el nexo común es la comparación entre los distintos escenarios para visualizar fácilmente la evolución y mejora entre las distintas variables de salida. El primero se refiere a variables referidas a aforo, contaje, tiempo, velocidad y conflictos, las cuales reflejan las diferencias entre seguridad vial y de tiempos de viaje, mientras que el segundo se refiere a variables de emisiones, donde se compara en detalle el nivel de emisiones de cada contaminante en cada escenario. Todos los resultados numéricos se pueden encontrar en el Anexo B.

8.1 Resultados por variable

8.1.1 Variables de Aforo y contaje

En primer lugar, el dato del contaje de entrada que Aimsun devuelve se refiere al número de vehículos que han entrado durante la simulación. Este dato se mantiene prácticamente constante en todos los escenarios, lo que vuelve a asegurar que el número de vehículos en circulación es muy cercano al dato real y que la calibración se ha resuelto satisfactoriamente:

- 46537 vehículos registrados de media en la hora punta con una desviación estándar de 198,56.
- 37579 vehículos registrados de media en la hora valle con una desviación estándar de 187,2.

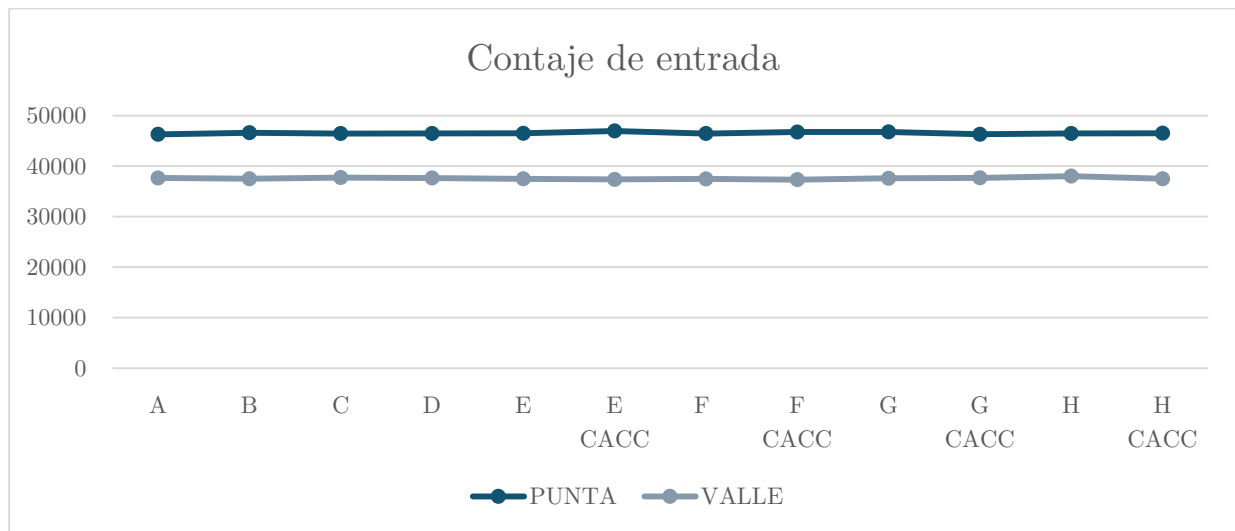


Figura 16: Número de vehículos por escenario y franja horaria

En segundo lugar, también ofrece el dato de densidad de vehículos por kilómetro, el cual se mantiene con cierta constancia en todos los escenarios:

- 13,28 vehículos por kilómetro de media en la hora punta con una desviación estándar de 0,42.
- 10,89 vehículos por kilómetro de media en la hora valle con una desviación estándar de 0,32.

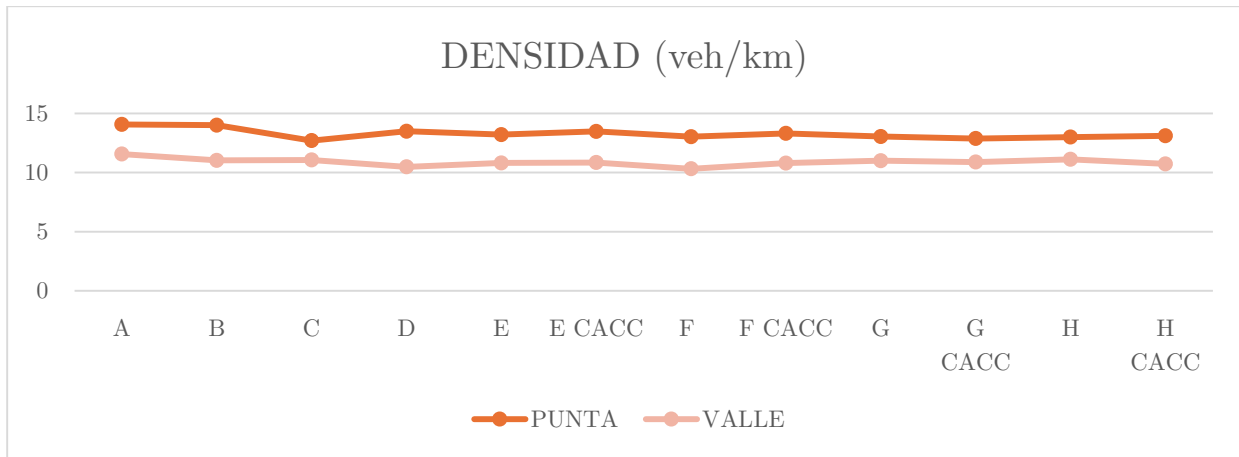


Figura 17: Cantidad de vehículos por kilómetro por escenario y franja horaria

En cualquier caso, se confirma que los resultados de densidad y contaje de entrada son constantes, reforzando la validación del modelo.

8.1.2 Variables de tiempo y velocidad

Aimsun ofrece cuatro variables sustanciales de tiempo y velocidad que reflejan cambios significativos entre los distintos escenarios: tiempo total de viaje, tiempo de demora, de parada, todas expresadas en segundo por kilómetro y velocidad media, en kilómetros por hora.

El tiempo total de viaje refleja una tendencia ligeramente descendente, comenzando desde los 48,45 del escenario A hasta los 46,41 segundos por kilómetro del escenario H en la hora punta. La gráfica resultante entre los distintos escenarios no es linealmente decreciente, se estabiliza a partir del escenario D. Además, no se muestran diferencias entre los escenarios con CACC activado y desactivado.

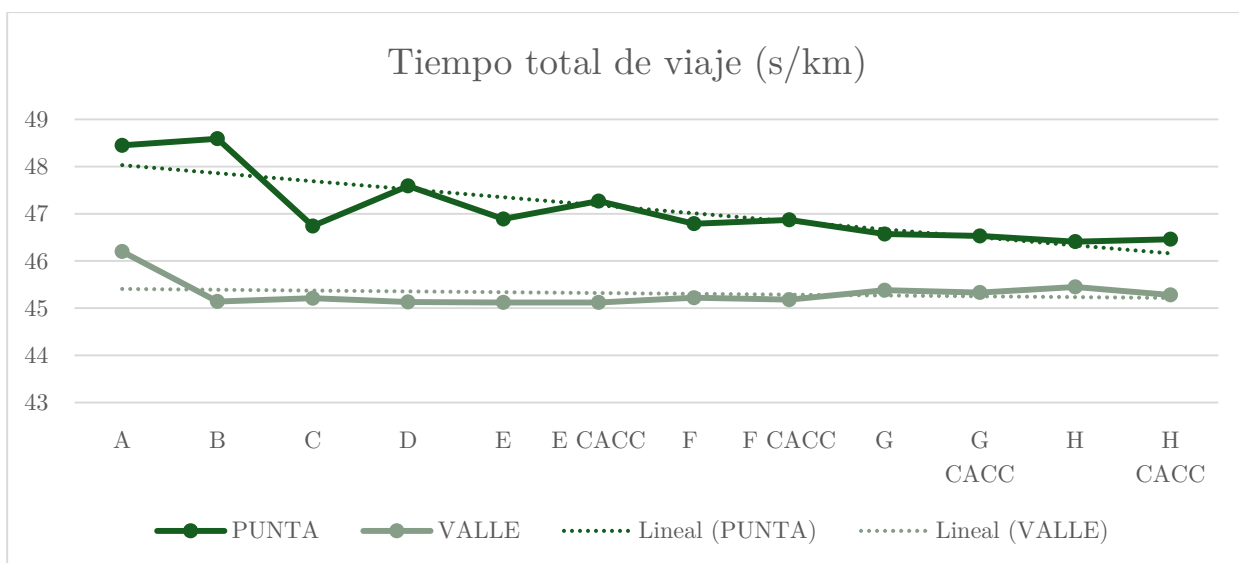


Figura 18: Tiempo de viaje en segundos por kilómetro por escenario y franja horaria

Igualmente, el tiempo de demora también es decreciente sin mostrar diferencias entre los escenarios con CACC activado/desactivado. Parte de un tiempo de 8,65 hasta los 3,84 segundos por kilómetro. Esta diferencia es incluso notable en la franja horaria valle.

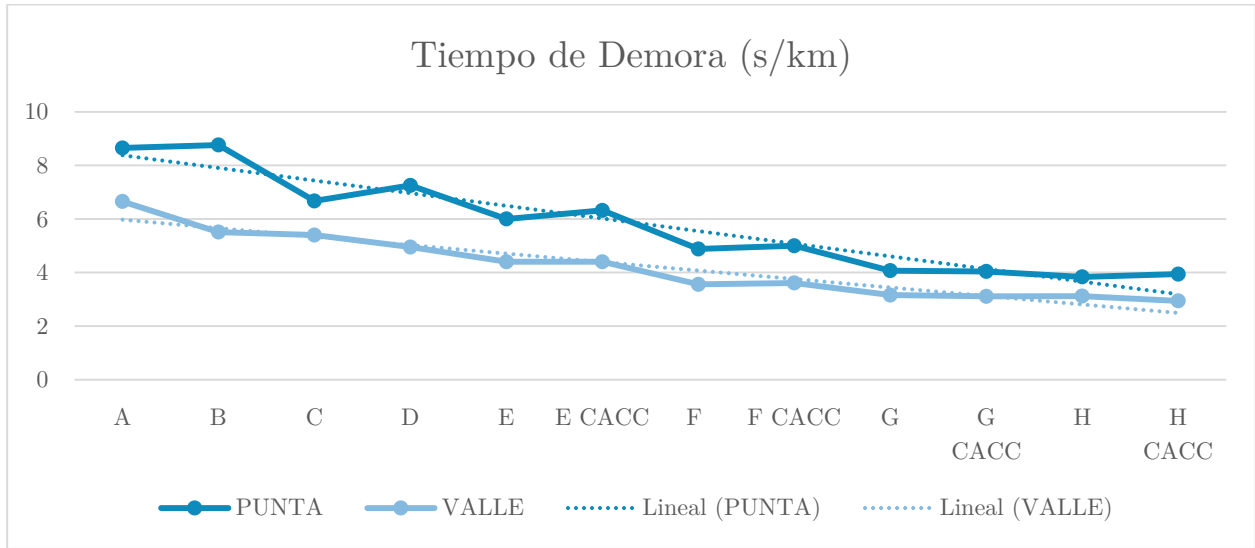


Figura 19: Tiempo de demora en segundos por kilómetro por escenario y franja horaria

Del mismo modo, el tiempo de parada es decreciente si se comparan los datos entre los escenarios A y H: 0,6 y 0,11 segundos por kilómetro respectivamente. No obstante, se observa una fuerte desestabilización de los tiempos de parada en los escenarios intermedios, en especial el escenario D, donde en la hora punta se obtiene un máximo de 0,76 segundos.

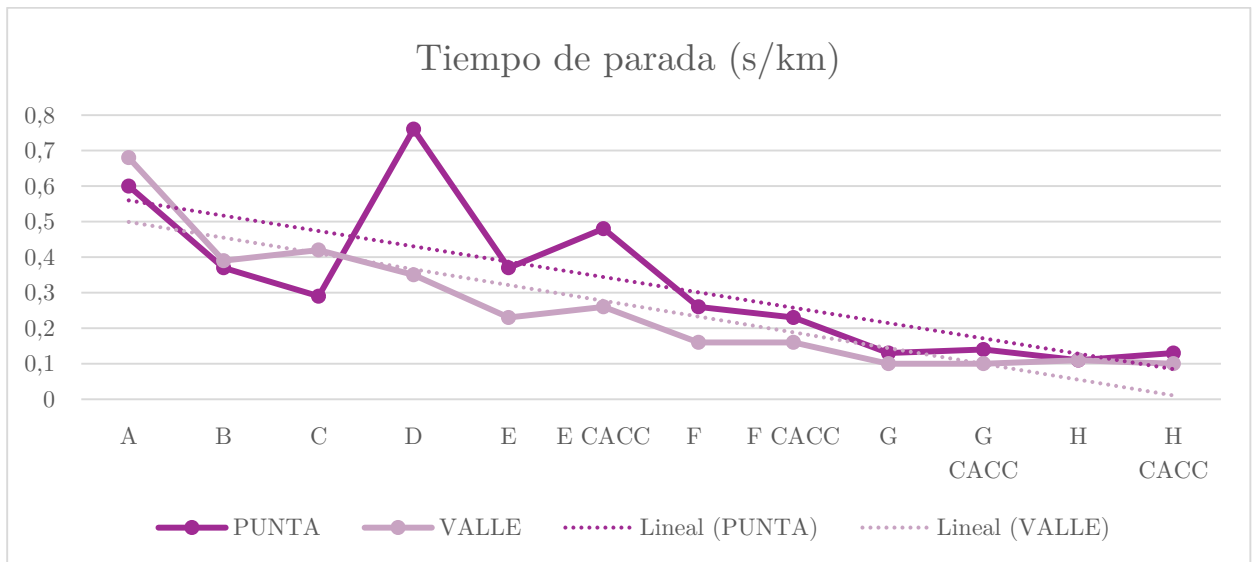


Figura 20: Tiempo de parada en segundos por kilómetro por escenario y franja horaria

Por último, la velocidad media es ligeramente creciente en ambas franjas horarias:

- El escenario B, hora punta, registra la mayor velocidad media: 81,47 km/h.
- El escenario A, hora valle, registra la menor velocidad media: 76,87 km/h.

Se podría decir que esta variable de salida no resulta influenciada por los distintos vehículos que circulan en cada uno de los escenarios.

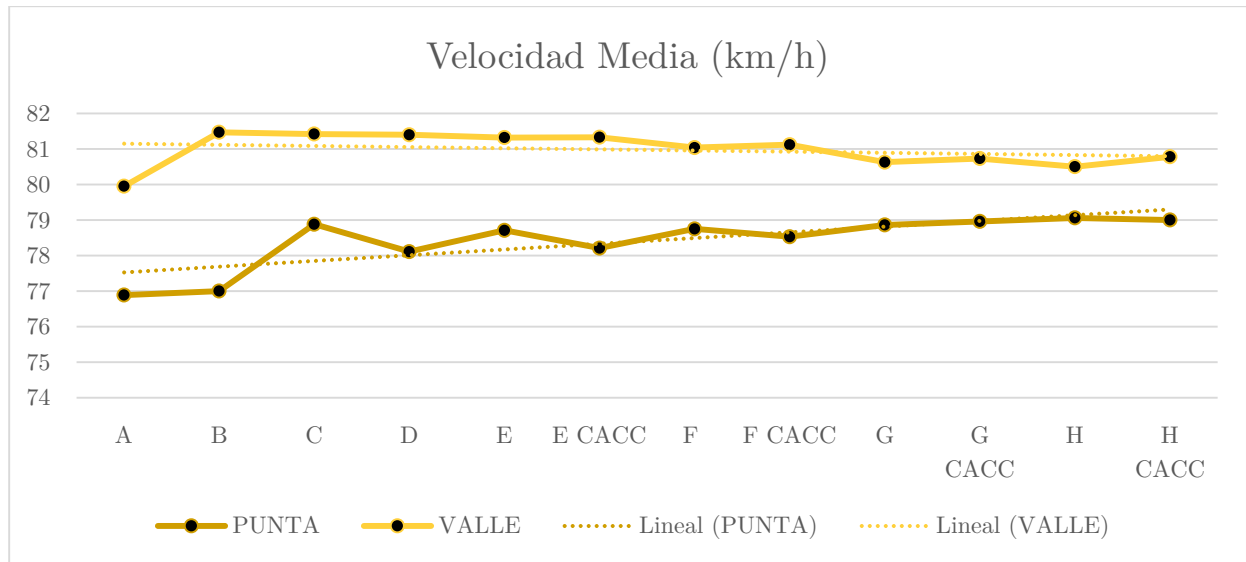


Figura 21: Velocidad media en Kilómetros por hora por escenario y franja horaria

8.1.3 Conflictos

Mediante el análisis de los archivos generados por la API SSAM de Aimsun, se puede visualizar fácilmente que los conflictos de alta peligrosidad disminuyen progresivamente conforme se van introduciendo vehículos con mayor grado de autonomía, aunque muy lentamente. Se consideran conflictos de alta peligrosidad aquellos que obligan a los vehículos a disminuir su velocidad en más de 30 km/h de manera casi instantánea. Se puede visualizar filtrando los datos con la variable MaxDeltaV superior a 30, obteniendo los siguientes resultados:

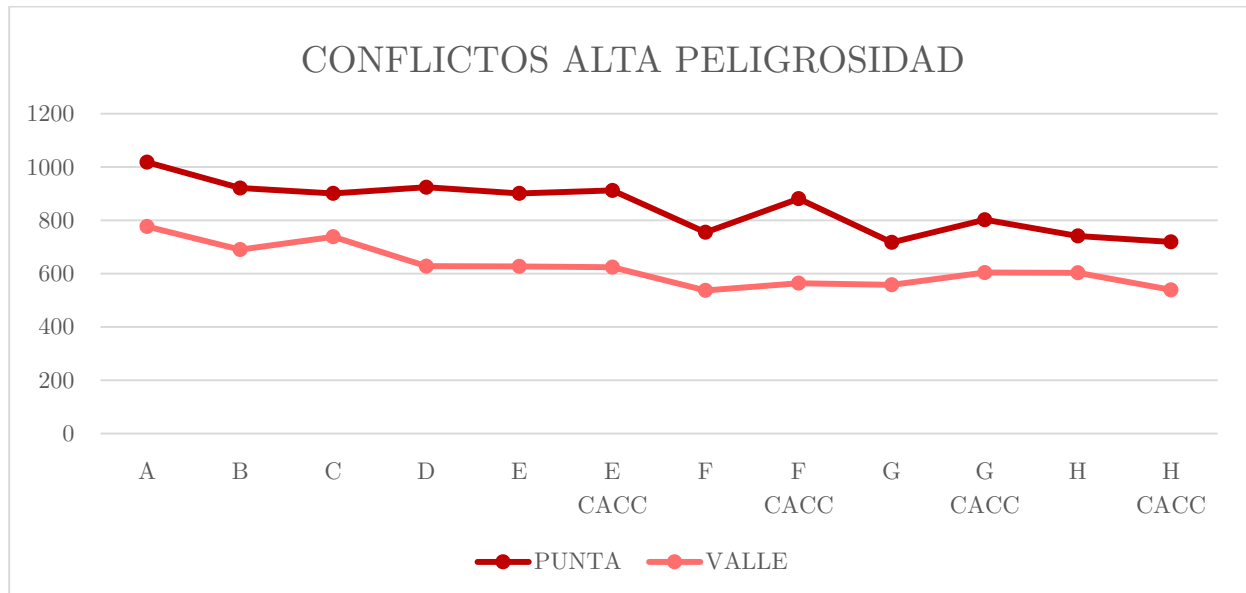


Figura 22: Conflictos de alta peligrosidad (MaxDeltaV > 30 km/h) por escenario y franja horaria

Se obtiene una disminución de 300 conflictos entre los escenarios A y H en la hora punta y de 250 en la hora valle. Las mayores disminuciones se registran entre los escenarios A y B y los escenarios E y F.

Otras variables destacables que influyen en la seguridad vial y que Aimsun devuelve al acabar la simulación son el número de giros perdidos y de cambios de carril.

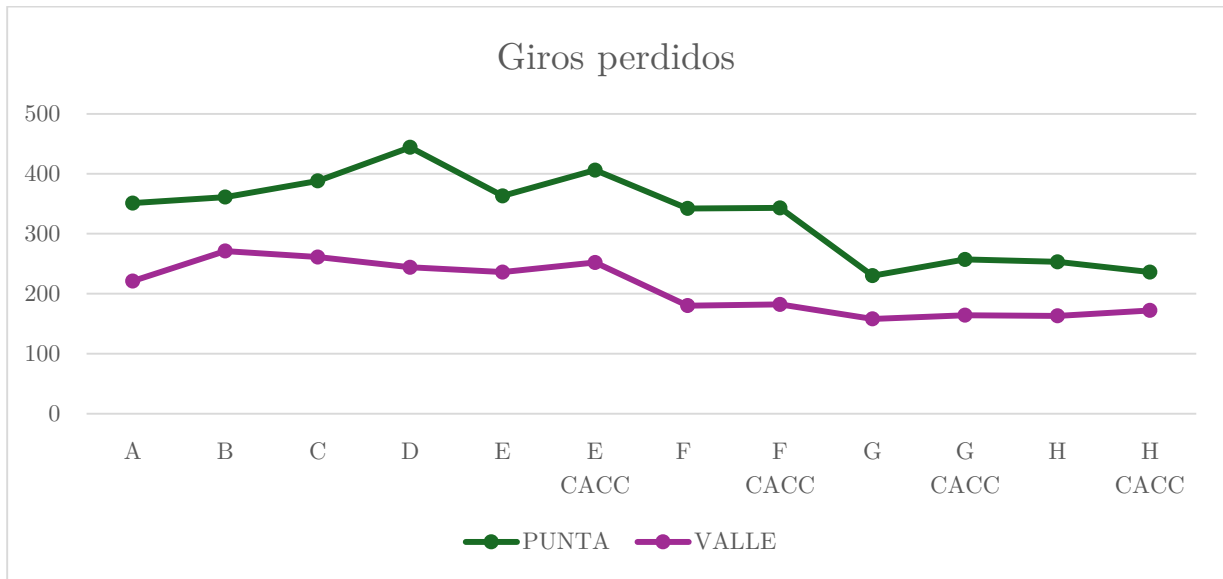


Figura 23: Giros perdidos por escenario y franja horaria

En el caso de los giros perdidos, los valores más elevados se concentran en los escenarios intermedios, con los valores más bajos en los escenarios G y H. Destaca el descenso en el número total de cambios de carril, pasando de casi 400.000 a 222.000 entre el primer y último escenario.

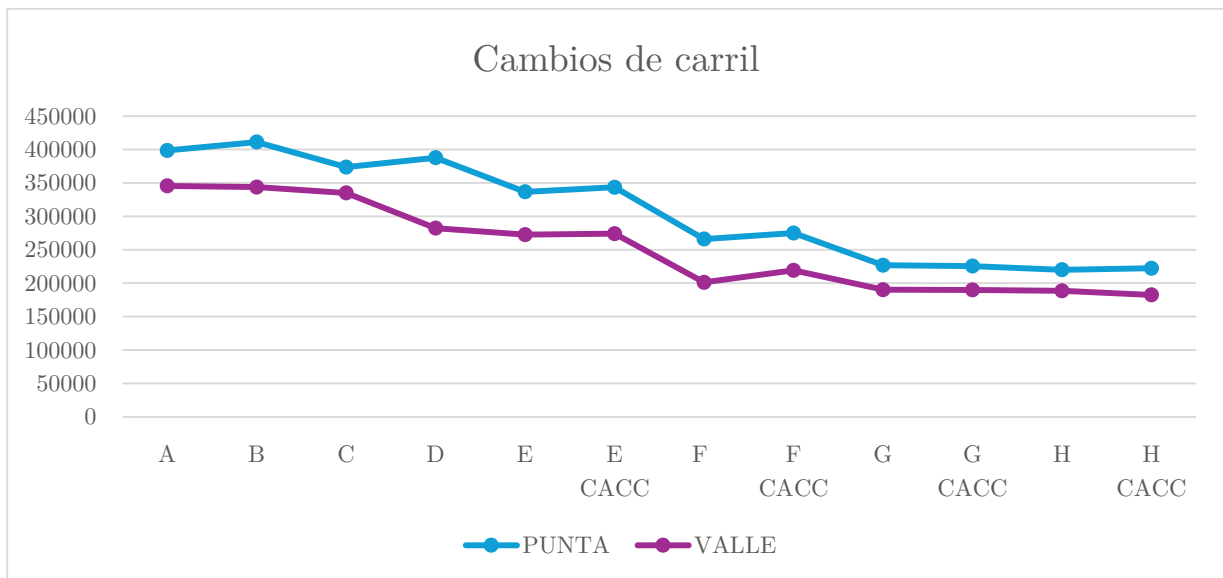


Figura 24: Cambios de carril por escenario y franja horaria

Sin embargo, al igual que en las variables anteriores de tiempo y velocidad, ninguna de ellas resulta afectada por el CACC.

8.2 Resultados de emisiones

8.2.1 Emisiones según la previsión del parque motor

Este apartado muestra los resultados de la primera serie de simulaciones, donde sus vehículos se han ajustado según el parque motor actual y previsto. Estos resultados son bastante predecibles: se reducen conforme el número de vehículos de gasolina/diésel se reduce y también es menor en la hora valle que en la hora punta al haber menor densidad de tráfico. Dado que se ha definido que los vehículos de nivel 4/5 sean 100% eléctricos, el escenario H tendrá siempre emisiones nulas. Además, no existe diferencia aparente entre un escenario con el 100% de dichos vehículos con CACC activado que con CACC desactivado. De hecho, el modelo de Panis indica que, si el CACC está activado, las emisiones resultantes son ligeramente superiores con respecto a si estuviera desactivado.

A continuación, Se muestran los resultados comparativos entre los distintos modelos, en g/km, para las emisiones de NO_x y PM₁₀ y CO₂ aportadas por los modelo de emisiones COPERT, London y Panis et al.

En primer lugar, se dan las emisiones de NO_x. El modelo de COPERT comienza con un elevado número de NO_x emitido en el escenario A, siguiendo con una brusca caída en los siguientes escenarios, mientras que el modelo de Panis es más conservador.

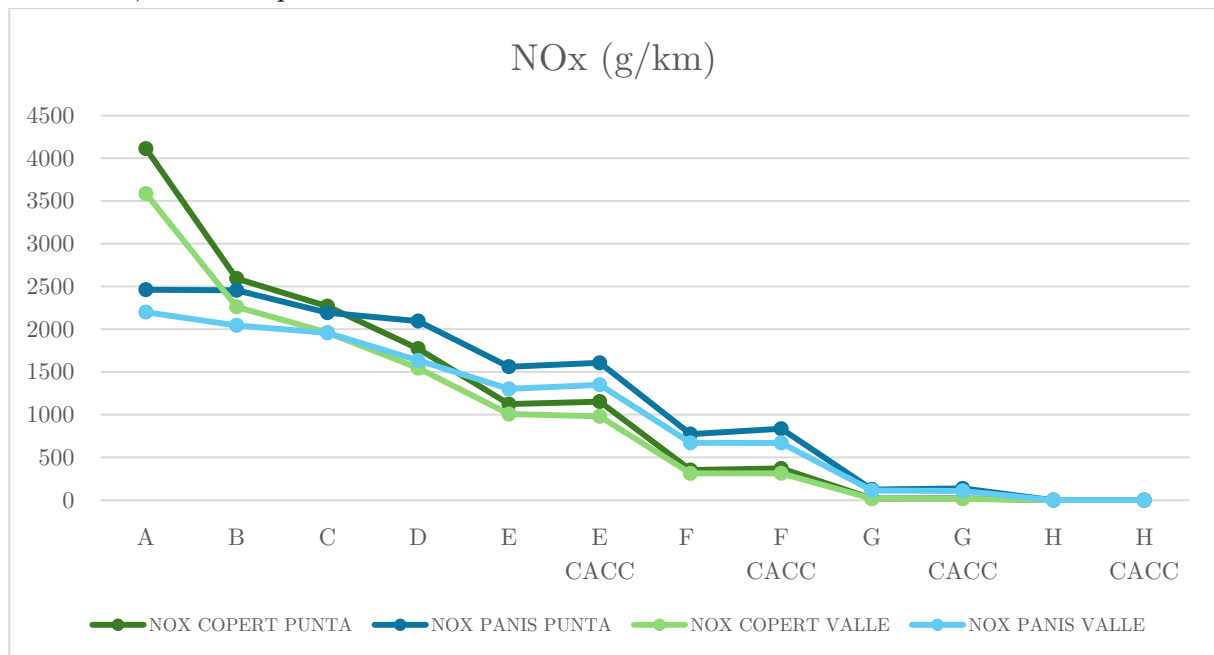


Figura 25: Gráfico de las emisiones de NO_x de los modelos COPERT y Panis

En segundo lugar, las emisiones de PM₁₀ son bastante similares en ambos modelos, salvo en los escenarios intermedios, donde el modelo de COPERT evalúa a la baja las emisiones emitidas. Destaca la fuerte diferencia en el modelo de Panis entre la hora punta y valle, algo que en el de COPERT no resulta tan pronunciada.

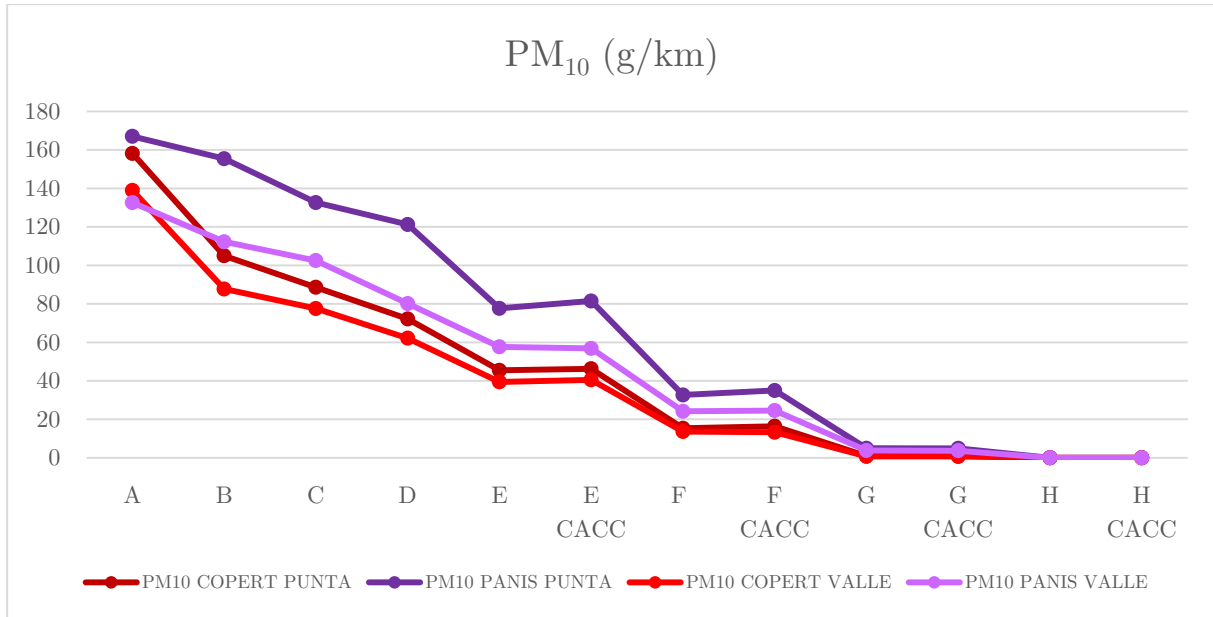


Figura 26: Gráfico de las emisiones de PM₁₀ de los modelos COPERT y Panis

En tercer lugar, las emisiones de CO₂ son bastante diferentes entre los modelos de Panis y de London. Al igual que en los modelos anteriores, Panis eleva significativamente las emisiones.

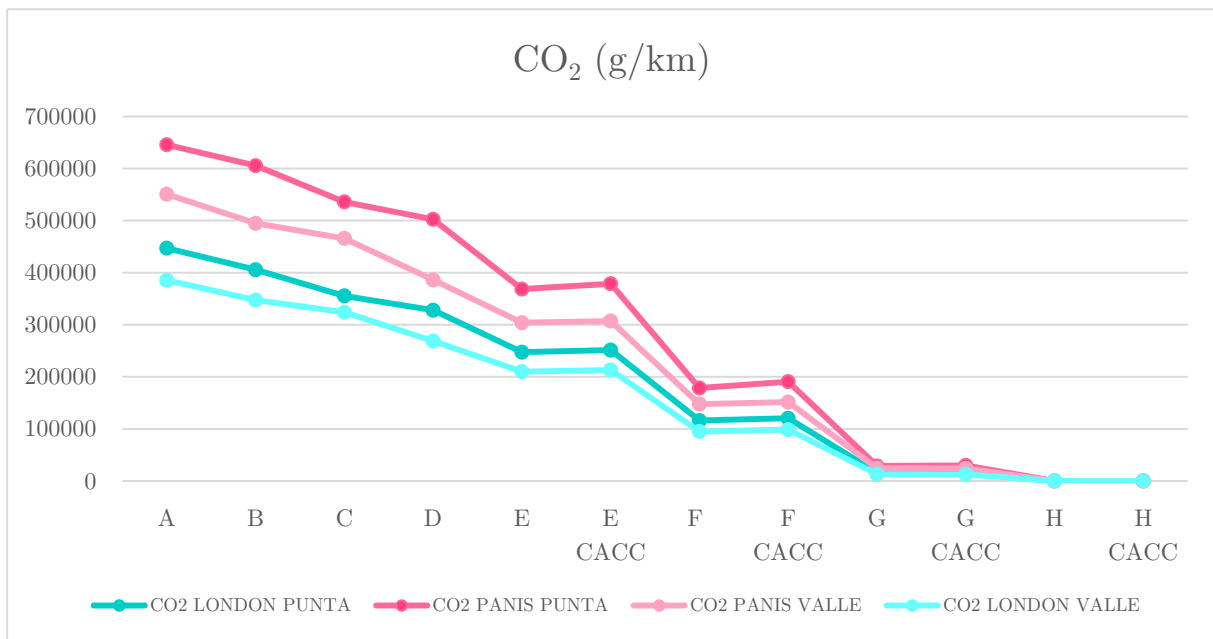


Figura 27: Gráfico de las emisiones de CO₂ de los modelos London y Panis

Por último, se dan las emisiones de CO por el modelo de emisiones de COPERT y del de VOC (Compuestos Orgánicos Volátiles) por el modelo de Panis. La primera muestra un descenso acusado de las emisiones de CO en los primeros escenarios, mientras que la segunda muestra un descenso de emisiones de VOC más lineal.

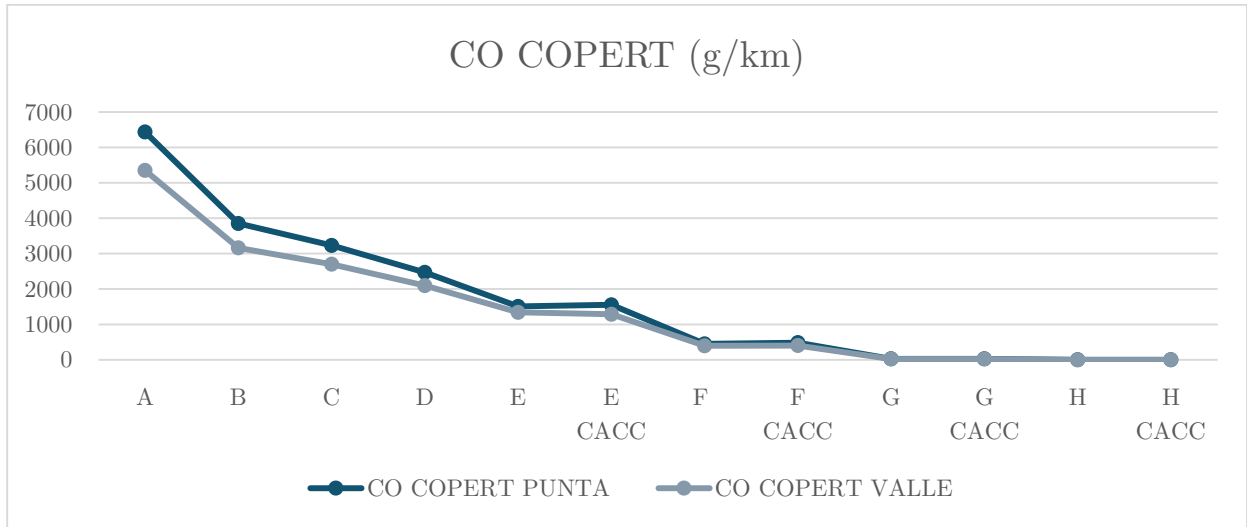


Figura 28: Gráfico de las emisiones de CO del modelo de COPERT

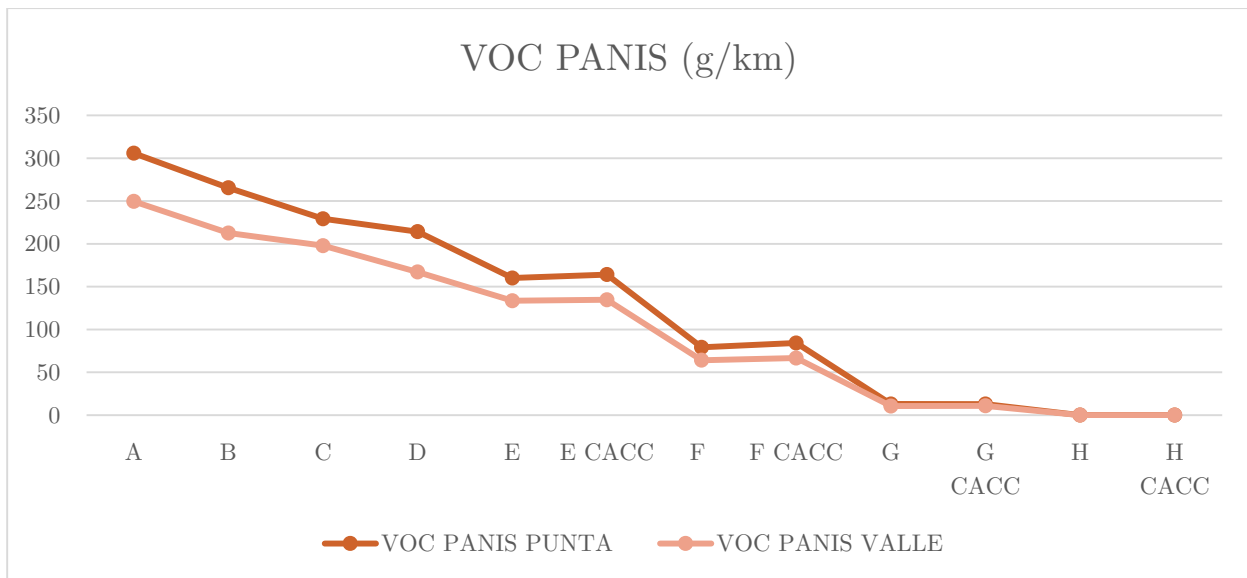


Figura 29: Gráfico de las emisiones de VOC del modelo de Panis

8.2.2 Emisiones imputables a la automatización

En este apartado se ha realizado la segunda serie de simulaciones, donde se ha tomado como referencia el escenario A: todos los vehículos de los escenarios A hasta la H tendrán el mismo parque motor y solo se distinguen entre sí por su nivel de automatización. Los resultados se muestran como diferencias con respecto a una referencia, en porcentajes, donde los positivos indican aumentos y los negativos disminuciones (lo deseable). El escenario A será la referencia (0%).

A continuación, se muestran las gráficas de la reducción de cada contaminante:

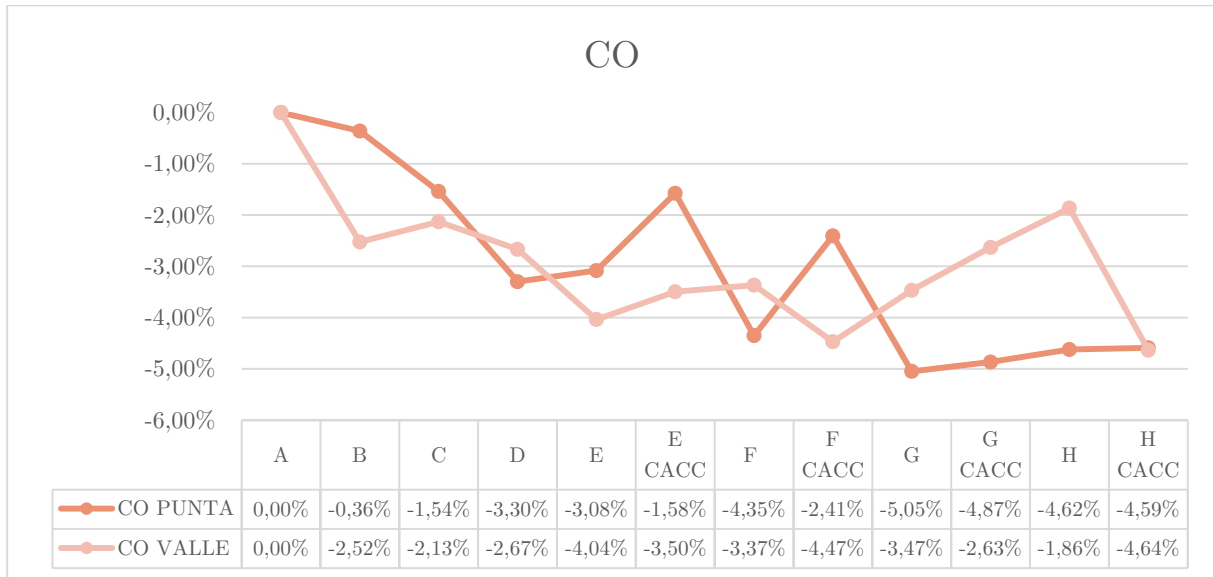


Figura 30: Gráfico de diferencias con respecto al escenario A del contaminante CO (%)

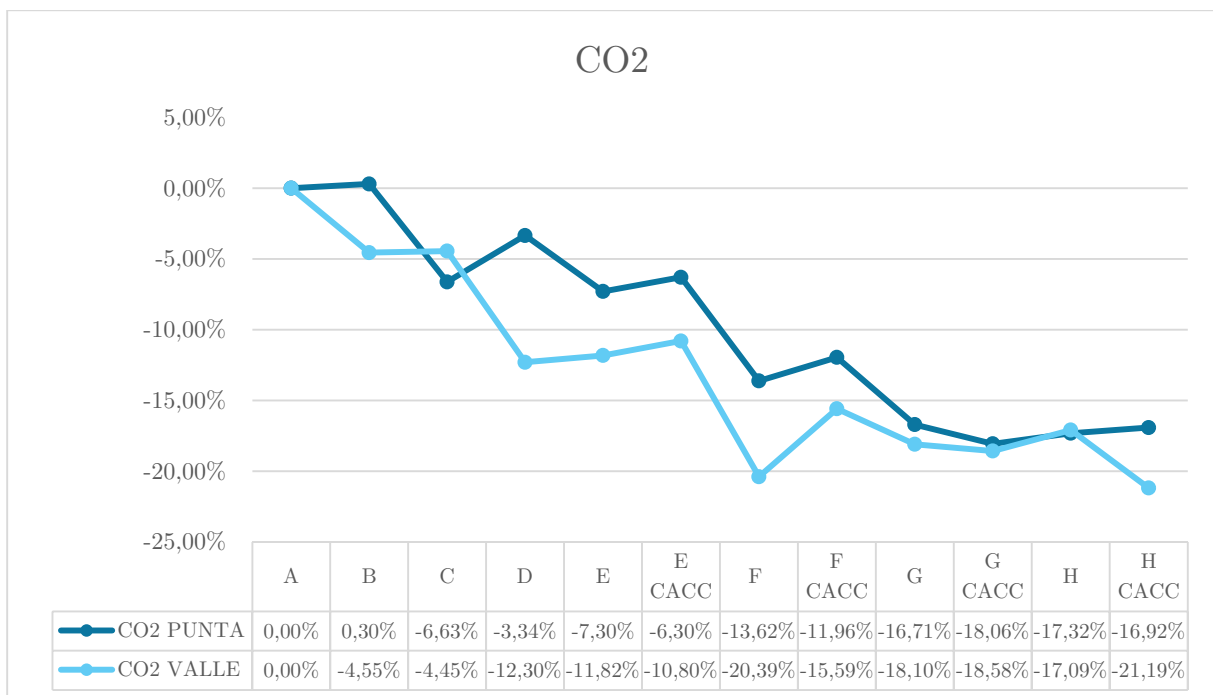


Figura 31: Gráfico de diferencias con respecto al escenario A del contaminante CO₂ (%)

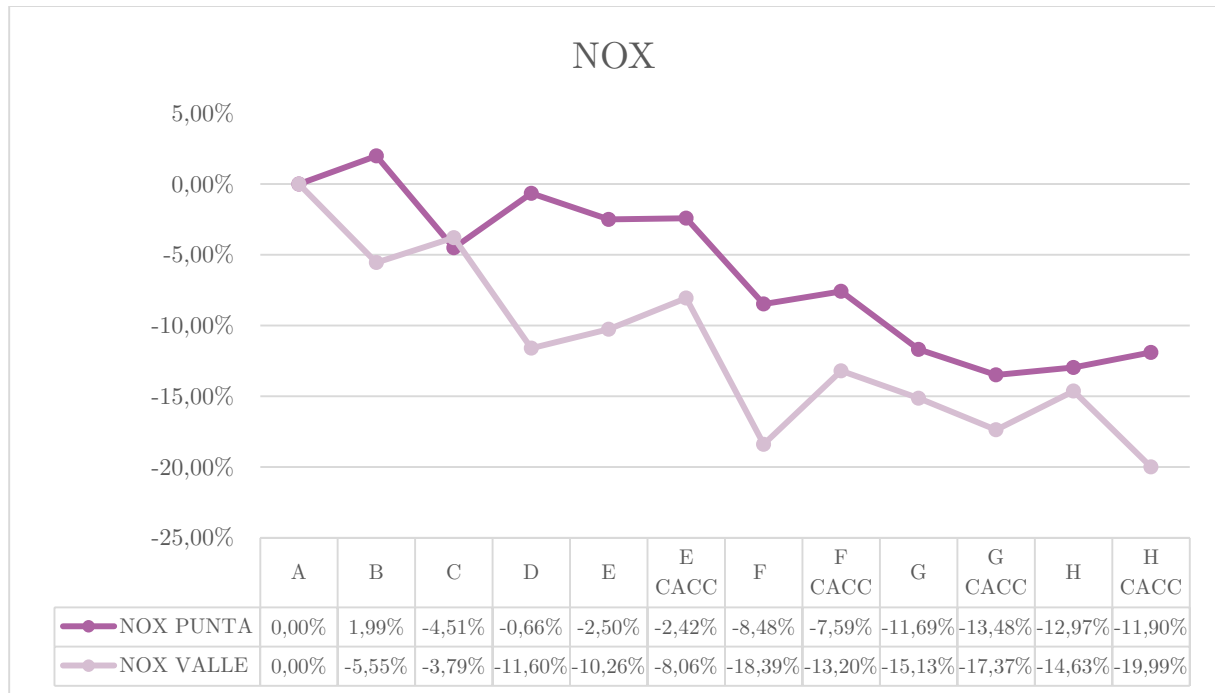


Figura 32: Gráfico de diferencias con respecto al escenario A del contaminante NO_x (%)

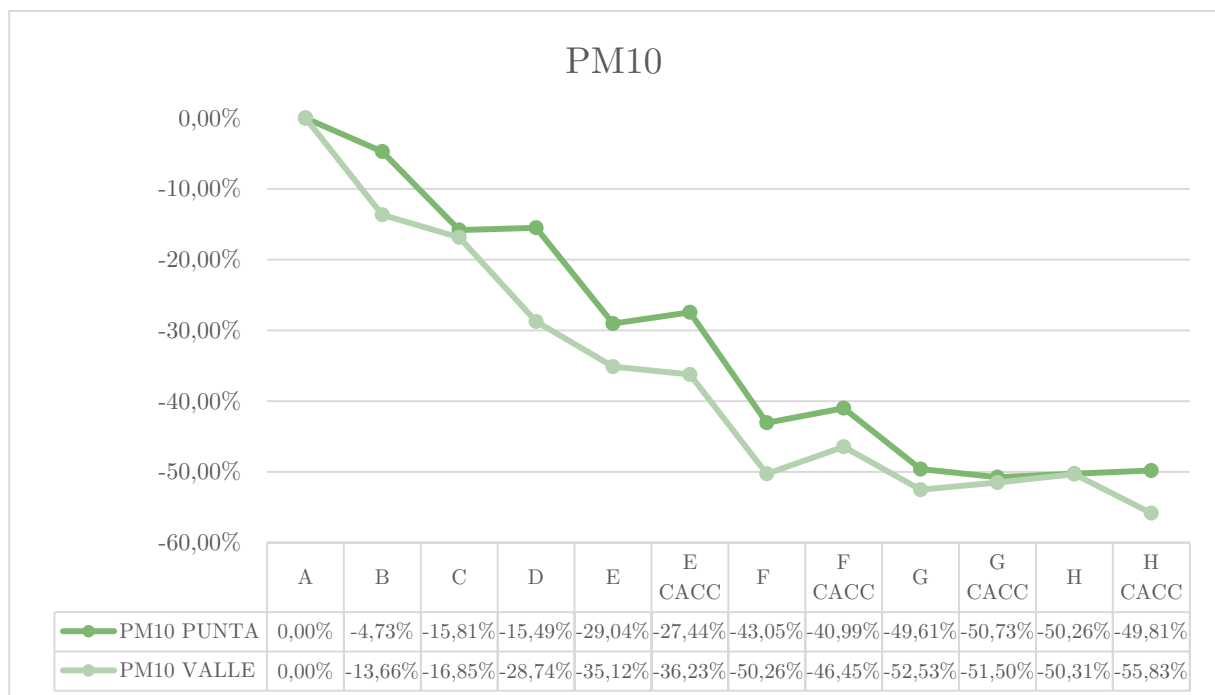


Figura 33: Gráfico de diferencias con respecto al escenario A del contaminante PM₁₀ (%)

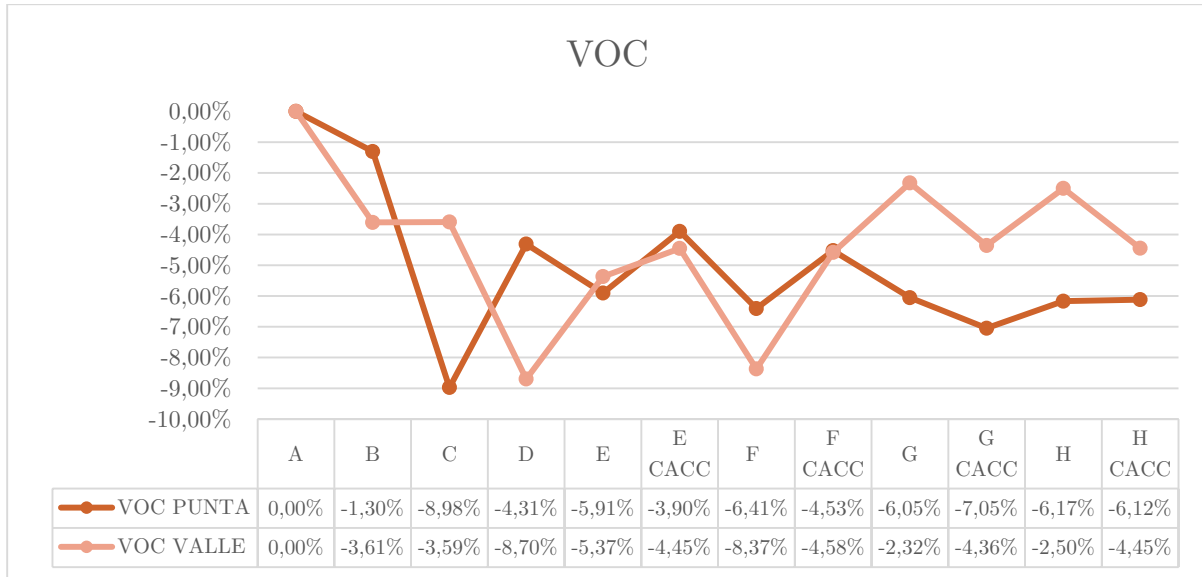


Figura 34: Gráfico de diferencias con respecto al escenario A del contaminante COV (%)

Se observa satisfactoriamente una caída generalizada de todos los contaminantes:

- Los contaminantes CO₂, NO_x y PM₁₀ muestran una caída general conforme el nivel del escenario especialmente en el último de ellos, donde la reducción es muy significativa, de hasta el 50%. Por lo tanto, **hay una relación directa entre el nivel de automatización de los vehículos y el porcentaje de reducción de los citados contaminantes.**
- Los contaminantes CO y COV sufren reducciones más irregulares, donde las mayores caídas se registran en escenarios intermedios. Además, el porcentaje de reducción es mucho menor en comparación al resto, de modo que no se puede concluir una relación entre el nivel de automatización y de la reducción de los contaminantes CO y COV.

Al igual que en los anteriores apartados, los vehículos equipados con CACC no mejoran tampoco en el nivel de emisiones.

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES E IMPACTOS

9.1 Conclusiones

La presente investigación ha permitido analizar con detalle el impacto que la progresiva incorporación de Vehículos Automatizados y Conectados (VAC) puede tener en la seguridad vial, la eficiencia del tráfico y las emisiones contaminantes en un tramo crítico de la M-40 de Madrid. A partir de la modelización y simulación con AIMSUN de distintos escenarios de transición tecnológica, se extraen una serie de conclusiones relevantes tanto en el plano técnico como en el estratégico.

En primer lugar, los resultados confirman que la automatización vehicular constituye una herramienta eficaz para mejorar la **seguridad vial**. A medida que aumenta el porcentaje de VAC, el número de conflictos simulados disminuye de forma significativa, especialmente a partir de la introducción de vehículos de nivel 3 y superiores. Estos niveles marcan un cambio cualitativo, ya que permiten una conducción más anticipativa, estable y cooperativa, reduciendo la probabilidad de colisiones y suavizando los comportamientos bruscos típicos del tráfico convencional. La transición no obstante requiere especial atención: en entornos mixtos, donde conviven vehículos convencionales y automatizados, persisten puntos de fricción que deben ser gestionados con políticas específicas de regulación e infraestructura.

En segundo lugar, la simulación demuestra que la automatización también aporta mejoras notables en la **fluidez y eficiencia del tráfico**. Los vehículos con mayor nivel de automatización son capaces de mantener distancias más cortas de seguridad, reaccionar con mayor rapidez y evitar maniobras innecesarias de frenado o aceleración. Como consecuencia, la capacidad efectiva de la vía aumenta, se reducen los episodios de congestión y se mejora la velocidad media en horas punta. Este efecto se intensifica en escenarios con mayor penetración de vehículos autónomos, lo que indica un potencial a largo plazo para optimizar el uso de las infraestructuras existentes sin necesidad de ampliarlas de forma significativa. Sin embargo, vistos los resultados obtenidos, **no se puede concluir que los vehículos equipados con tecnologías CACC tengan mejoras significativas** si se comparan con aquellos que no lo tienen instalado.

En tercer lugar, los resultados muestran un impacto claro sobre la **sostenibilidad ambiental**. La incorporación de VAC, junto con el crecimiento progresivo de los vehículos eléctricos, conduce a una reducción significativa de emisiones de CO₂ y NO_x. Los escenarios a partir de 2040 reflejan una caída notable en contaminantes gracias a la mayor presencia de flotas electrificadas, según la previsión del parque motor, y a la conducción más eficiente de los vehículos automatizados. Esto confirma que la automatización, si va acompañada de políticas de electrificación, puede ser un factor decisivo en la lucha contra el cambio climático y la mejora de la calidad del aire en áreas metropolitanas.

Más allá de estos tres ejes principales, el trabajo pone de relieve la importancia de diseñar **estrategias de transición**. Los beneficios plenos de la automatización no se alcanzarán de forma inmediata, sino en un horizonte temporal de varias décadas. En este periodo intermedio, la

coexistencia entre vehículos convencionales y automatizados exige la adaptación de las infraestructuras, la definición de protocolos de convivencia en la carretera y una actualización del marco legal y normativo. Aspectos como la gestión de carriles exclusivos para VAC, la responsabilidad legal en caso de accidente o la aceptación social de la tecnología son elementos que requieren atención inmediata por parte de administraciones y legisladores.

El trabajo también destaca el valor del uso de **herramientas de microsimulación** como AIMSUN en la planificación estratégica. La posibilidad de modelar comportamientos individuales de vehículos y extrapolar sus efectos a nivel macro permite anticipar de manera fiable los impactos de nuevas tecnologías antes de su despliegue real.

En resumen, las conclusiones principales son las siguientes:

1. La automatización reduce de forma significativa los conflictos viales y mejora la seguridad, con beneficios especialmente claros a partir de niveles 3-5, *escenarios E a H*. Los resultados muestran una caída de conflictos de hasta el 25%.
2. El tráfico se vuelve más eficiente y fluido, aumentando la capacidad de la infraestructura existente y reduciendo episodios de congestión. El tiempo de demora desciende un 50% mientras que el de parada desciende en hasta un 66%.
3. La automatización, combinada con la electrificación, contribuye de manera decisiva a la reducción de emisiones contaminantes. Únicamente la automatización contribuye a reducir los niveles de CO₂ y NOx en poco más del 15%, mientras que las partículas contaminantes en suspensión se reducen a la mitad.
4. La fase de transición plantea retos complejos que deben abordarse desde la planificación, la regulación y la infraestructura.
5. Las herramientas de simulación constituyen un recurso fundamental para evaluar, anticipar y gestionar la movilidad futura.

La introducción progresiva de vehículos automatizados en la M-40 y, por extensión, en la red viaria española, tiene el potencial de transformar positivamente la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad del sistema de transporte. No obstante, alcanzar plenamente estos beneficios requerirá una gestión cuidadosa de la transición, la adaptación del marco normativo y el diseño de políticas que acompañen la innovación tecnológica con medidas sociales, ambientales y de infraestructura.

9.2 Evaluación de impactos

El análisis realizado en este trabajo no solo permite extraer conclusiones técnicas y operativas, sino también valorar los efectos más amplios que la progresiva introducción de vehículos automatizados y conectados (VAC) puede generar en distintos ámbitos de la sociedad.

9.2.1 Impactos Sociales

Los VACs tienen el potencial de transformar la movilidad desde una perspectiva inclusiva. La conducción autónoma puede facilitar el acceso al transporte privado para colectivos tradicionalmente dependientes, como personas mayores, menores de edad o personas con discapacidad. Esto podría traducirse en una mayor independencia, accesibilidad y equidad en la movilidad.

Otro aspecto social relevante es la mejora en la seguridad vial. La reducción de conflictos y accidentes no solo disminuye la siniestralidad, sino que también reduce el trauma social asociado a las víctimas de tráfico, que sigue siendo uno de los principales problemas de salud pública. A ello se suma la posibilidad de reducir el estrés de los conductores en desplazamientos rutinarios o de larga duración, lo que repercute en una mejor calidad de vida.

No obstante, la transición también puede generar tensiones sociales vinculadas a la aceptación de la tecnología. La confianza en los sistemas autónomos, la convivencia con vehículos convencionales y la percepción de seguridad por parte de los usuarios serán factores determinantes para su adopción masiva.

9.2.2 Impactos Medioambientales

Desde el punto de vista ambiental, los resultados muestran un efecto positivo claro: una reducción significativa de las emisiones contaminantes. La conducción más eficiente de los VACs, con menos aceleraciones y frenadas bruscas, y la creciente electrificación de la flota permiten reducir los niveles de CO₂, NO_x y partículas en suspensión (PM₁₀). Esto se traduce en mejoras en la calidad del aire urbano y, a largo plazo, en contribuciones sustanciales a los objetivos de mitigación del cambio climático.

Además, la optimización del flujo vehicular permite un uso más racional de las infraestructuras existentes, lo que evita o retrasa la construcción de nuevas carreteras, con el consiguiente ahorro en consumo de suelo y recursos naturales.

El impacto ambiental positivo, sin embargo, depende en gran medida de que la automatización se acompañe de políticas que incentiven la electrificación y la movilidad sostenible. Una adopción centrada únicamente en vehículos autónomos de combustión limitaría en gran medida los beneficios medioambientales previstos.

9.2.3 Impactos Económicos

En el plano económico, los VACs representan tanto una oportunidad como un reto. Entre los beneficios destacan la reducción de costes asociados a los accidentes de tráfico (atención sanitaria, daños materiales, indemnizaciones) y los ahorros derivados de un menor consumo de combustible gracias a una conducción más eficiente. A nivel macroeconómico, la disminución de siniestralidad y congestión puede mejorar la productividad, al reducirse los tiempos de desplazamiento y aumentar la fiabilidad en el transporte de personas y mercancías.

Asimismo, la introducción de los VACs puede estimular sectores emergentes vinculados al desarrollo tecnológico, la industria automovilística, la gestión de datos y la ciberseguridad, generando nuevas oportunidades de empleo y negocio.

Por otro lado, la transición puede implicar costes elevados en fases iniciales: inversión en infraestructuras adaptadas, actualización de señalización, despliegue de tecnologías V2X y renovación del parque motor. También podrían producirse efectos disruptivos en sectores como el transporte profesional, con riesgos de pérdida de empleo en determinadas actividades (por ejemplo, conductores profesionales).

9.2.4 Impactos Legales y Éticos

El despliegue de la conducción automatizada plantea desafíos legales y éticos de gran envergadura. Uno de los principales es la definición de responsabilidades en caso de accidente: ¿debe recaer en el fabricante, en el proveedor del software o en el usuario? Este aspecto requiere un marco normativo claro y armonizado a nivel nacional e internacional.

Otro reto está relacionado con la **protección de datos y la privacidad**. Los VACs generan y comparten continuamente información sobre la localización, los hábitos de conducción y las condiciones del tráfico. Su correcta gestión es fundamental para garantizar la confianza ciudadana y el respeto a la normativa de protección de datos.

Desde el punto de vista ético, emergen debates en torno a la programación de algoritmos de decisión en situaciones críticas, así como sobre el impacto en el empleo de sectores dependientes de la conducción. Estos dilemas exigen un abordaje transparente y participativo, que incorpore no solo a expertos técnicos, sino también a la sociedad civil y a los responsables políticos.

CAPÍTULO 10: LÍNEAS FUTURAS

Aunque este trabajo aporta valiosas contribuciones en relación con la investigación de la seguridad vial y en especial de la reducción de emisiones contaminantes durante el periodo de transición entre la conducción manual y la conducción autónoma, se podrían haber añadido una serie de investigaciones más profundas, tales como:

- Un análisis más exhaustivo de los conflictos aplicando un análisis de sensibilidad a los parámetros significativos. Este es el mejor enfoque para comprender como influirán los VACs en la seguridad vial. Permite distinguir todos los tipos de conflictos que se crean, evaluando su gravedad y los distintos tipos de vehículos implicados
- Realizar un mayor número de simulaciones variando los parámetros de los vehículos equipados con CACC. El objetivo es ajustar los parámetros del CACC de modo que haya mejoras significativas con respecto a los vehículos que no lo tengan equipados. En la presente investigación se dejaron los parámetros predeterminados y no existe literatura suficiente sobre microsimulación que incluya vehículos con tecnología CACC equipada para poder introducir los parámetros óptimos.
- Evaluar el consumo de todos los vehículos. Un error no resuelto provocaba que el programa Aimsun interrumpiera la simulación cuando se activaba la casilla de consumos.
- Introducir en la simulación una nueva serie de escenarios con uno o varios carriles dedicados exclusivamente a la circulación de vehículos del máximo nivel de autonomía (*Platoon Lanes*). Esto implicaría doblar el número de simulaciones hechas en este trabajo.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. J. Fagnant y K. Kockelman, «Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations», *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 77, pp. 167-181, jul. 2015, doi: 10.1016/J.TRA.2015.04.003.
- [2] C. M. Martínez y D. Cao, «Conclusions, discussion and future direction for research», *Ihorizon-Enabled Energy Management for Electrified Vehicles*, pp. 335-374, ene. 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-815010-8.00008-9.
- [3] M. Sivak y B. Schoettle, «Road safety with self-driving vehicles: general limitations and road sharing with conventional vehicles», 2015, Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/111735>
- [4] K. E. Will, L. E. Decina, E. L. Maple, y A. M. Perkins, «TRAFFIC SAFETY FACTS Effectiveness of Child Passenger Safety Information For the Safe Transportation of Children», 2013, Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/812121-safe_transportation_of_children.pdf
- [5] T. Miqdady, R. De Ona, J. Casas, y J. De Ona, «Studying Traffic Safety During the Transition Period Between Manual Driving and Autonomous Driving: A Simulation-Based Approach», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, n.º 6, pp. 6690-6710, jun. 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3241970.
- [6] T. F. Mohammad Miqdady, «Studying the safety impact of sharing different levels of connected and automated vehicles using simulationbased surrogate safety measures», jul. 2023, Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/84423>
- [7] «M-40, M-50, A-2, A-4 y A-42 acumulan la mayor parte de los accidentes en Madrid — Gacetín Madrid», Madrid, 27 de diciembre de 2024. Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gacetinmadrid.com/2024/12/27/m40-m50-a2-a4-a42-acumulan-mayor-accidentes-madrid/>
- [8] Department for Transport, «Research on the Impacts of Connected and Autonomous Vehicles (CAVs) on Traffic Flow Summary Report Department for Transport», *ATKINS*, may 2016, Accedido: 23 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7f6967ed915d74e622a4bc/impacts-of-connected-and-autonomous-vehicles-on-traffic-flow-summary-report.pdf>
- [9] P. Tientrakool, Y. C. Ho, y N. F. Maxemchuk, «Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance», *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2011, doi: 10.1109/VETEFC.2011.6093130.
- [10] J. Bierstedt, A. Gooze, C. Gray, J. Peterman, Raykin L., y J. Walters, «Effects of next-generation vehicles on travel demand and highway capacity», 2014.
- [11] L. C. Davis, «Effect of adaptive cruise control systems on mixed traffic flow near an on-ramp», *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 379, n.º 1, pp. 274-290, jun. 2007, doi: 10.1016/J.PHYSA.2006.12.017.
- [12] «V2X Software Development Kit - Aimsun Next Users Manual». Accedido: 17 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.Aimsun.com/next/24.0.2/UsersManual/V2X.html>

11. BIBLIOGRAFÍA

- [13] Z. Hameed Mir y F. Filali, «LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation», *EURASIP J Wirel Commun Netw*, vol. 2014, n.º 1, pp. 1-15, dic. 2014, doi: 10.1186/1687-1499-2014-89/FIGURES/18.
- [14] B. Padmaja, C. V. K. N. S. N. Moorthy, N. Venkateswarulu, y M. M. Bala, «Exploration of issues, challenges and latest developments in autonomous cars», *J Big Data*, vol. 10, n.º 1, pp. 1-24, dic. 2023, doi: 10.1186/S40537-023-00701-Y/FIGURES/5.
- [15] Society of Automotive Engineers, «Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles», abr. 2021, doi: 10.4271/J3016_202104.
- [16] «DGT - Vehículos de conducción automatizada». Accedido: 13 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/tecnologia-e-innovacion-en-carretera/vehiculos-de-conduccion-automatizada/>
- [17] C. M. Martínez y D. Cao, «iHorizon-enabled energy management for electrified vehicles», *iHorizon-Enabled Energy Management for Electrified Vehicles*, pp. 1-425, ene. 2018, doi: 10.1016/C2017-0-02869-0.
- [18] C. Atiyeh, «Predicting traffic patterns, one Honda at a time», *MSN Auto*, 25, pp. 106-136, 2012.
- [19] I. M. Berry, «The effects of driving style and vehicle performance on the real-world fuel consumption of U.S. light-duty vehicles», 2010, Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/58392>
- [20] K. Bullis, «How vehicle automation will cut fuel consumption», *MIT's Technology Review*, 24., 2011.
- [21] J. M. Wood, «Aging, driving and vision», *Clin Exp Optom*, vol. 85, n.º 4, pp. 214-220, jul. 2002, doi: 10.1111/J.1444-0938.2002.TB03040.X.
- [22] National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), «Traffic Safety Facts Report», *NHTSA's National Center for Statistics and Analysis*, p. 216, 2016.
- [23] C. Wang, Y. Xie, H. Huang, y P. Liu, «A review of surrogate safety measures and their applications in connected and automated vehicles safety modeling», *Accid Anal Prev*, vol. 157, p. 106157, jul. 2021, doi: 10.1016/J.AAP.2021.106157.
- [24] W. Genders y S. N. Razavi, «Impact of Connected Vehicle on Work Zone Network Safety through Dynamic Route Guidance», *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 30, n.º 2, p. 04015020, mar. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000490.
- [25] M. M. Morando, Q. Tian, L. T. Truong, y H. L. Vu, «Studying the Safety Impact of Autonomous Vehicles Using Simulation-Based Surrogate Safety Measures», *J Adv Transp*, vol. 2018, n.º 1, p. 6135183, ene. 2018, doi: 10.1155/2018/6135183.
- [26] L. Ye y T. Yamamoto, «Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow», *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 490, pp. 269-277, ene. 2018, doi: 10.1016/J.PHYSA.2017.08.015.
- [27] A. Papadoulis, M. Quddus, y M. Imprialou, «Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways», *Accid Anal Prev*, vol. 124, pp. 12-22, mar. 2019, doi: 10.1016/J.AAP.2018.12.019.
- [28] M. S. Rahman, M. Abdel-Aty, J. Lee, y M. H. Rahman, «Safety benefits of arterials' crash risk under connected and automated vehicles», *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 100, pp. 354-371, mar. 2019, doi: 10.1016/J.TRC.2019.01.029.

- [29] H. Xie *et al.*, «Quantifying the impact of autonomous vehicles using microscopic simulations», *IWCTS 2019 - Proceedings of the 12th International Workshop on Computational Transportation Science*, nov. 2019, doi: 10.1145/3357000.3366145.
- [30] N. Viridi, H. Grzybowska, S. T. Waller, y V. Dixit, «A safety assessment of mixed fleets with Connected and Autonomous Vehicles using the Surrogate Safety Assessment Module», *Accid Anal Prev*, vol. 131, pp. 95-111, oct. 2019, doi: 10.1016/J.AAP.2019.06.001.
- [31] J. Zhang, K. Wu, M. Cheng, M. Yang, Y. Cheng, y S. Li, «Safety Evaluation for Connected and Autonomous Vehicles' Exclusive Lanes considering Penetrate Ratios and Impact of Trucks Using Surrogate Safety Measures», *J Adv Transp*, vol. 2020, n.º 1, p. 5847814, ene. 2020, doi: 10.1155/2020/5847814.
- [32] M. Guériau y I. Dusparic, «Quantifying the impact of connected and autonomous vehicles on traffic efficiency and safety in mixed traffic», *2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2020*, sep. 2020, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294174.
- [33] A. Sinha, S. Chand, K. P. Wijayarathna, N. Viridi, y V. Dixit, «Comprehensive safety assessment in mixed fleets with connected and automated vehicles: A crash severity and rate evaluation of conventional vehicles», *Accid Anal Prev*, vol. 142, p. 105567, jul. 2020, doi: 10.1016/J.AAP.2020.105567.
- [34] Y. El-Hansali, S. Farrag, A. Yasar, E. Shakshuki, y K. Al-Abri, «Using Surrogate Measures to Evaluate the Safety of Autonomous Vehicles», *Procedia Comput Sci*, vol. 191, pp. 151-159, ene. 2021, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.07.020.
- [35] A. Sharma, Z. Zheng, J. Kim, A. Bhaskar, y M. Mazharul Haque, «Assessing traffic disturbance, efficiency, and safety of the mixed traffic flow of connected vehicles and traditional vehicles by considering human factors», *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 124, p. 102934, mar. 2021, doi: 10.1016/J.TRC.2020.102934.
- [36] W. Weijermars *et al.*, «LEVITATE: Road safety impacts of Connected and Automated Vehicles», jul. 2021, Accedido: 31 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://levitate-project.eu/wp-content/uploads/2021/06/Road-safety-impacts-of-Connected-and-Automated-Vehicles.pdf>
- [37] P. G. Gipps, «A behavioural car-following model for computer simulation», *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 15, n.º 2, pp. 105-111, abr. 1981, doi: 10.1016/0191-2615(81)90037-0.
- [38] L. Stibor, Y. Zang, y H. J. Reumerman, «Evaluation of communication distance of broadcast messages in a vehicular ad-hoc network using IEEE 802.11p», *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, pp. 254-257, 2007, doi: 10.1109/WCNC.2007.53.
- [39] «Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) - FHWA-HRT-08-049». Accedido: 15 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/08049/>
- [40] «Environmental Models - Aimsun Next Users Manual». Accedido: 12 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.Aimsun.com/next/22.0.2/UsersManual/EnvironmentalModels.html#panis-et-al-pollutant-emission-model>

11. BIBLIOGRAFÍA

- [41] «Aimsun Next Users Manual». Accedido: 13 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://docs.Aimsun.com/next/24.0.2/>
- [42] *Ley 37/2015, de 29 de septiembre, de carreteras*. Boletín Oficial del Estado, 2015. Accedido: 6 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2015/09/30/pdfs/BOE-A-2015-10439.pdf>
- [43] A. Monzón y M. T. Alcaide, «Impactos ambientales y energéticos de las circunvalaciones urbanas. El caso de la M-40», *Informes de la Construcción*, vol. 47, n.º 441-442, pp. 75-85, abr. 1996, doi: 10.3989/IC.1996.V47.I441-442.1021.
- [44] J. Manuel, D. E. Lázaro, y Y. Perez-Toled, «M-40, ruido, especulación y conciencia medioambiental», *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, pp. 709-720, dic. 1998, Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/85513>
- [45] «Metidos en Carretera - Inauguración del Distribuidor Sur de la M-40 (Informativo Territorial RTVE, 29/11/1990)». Accedido: 6 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://metidosencarretera.esy.es/videos/tvemadinauguracionM4029111990/tvemadinauguracionM4029111990.html>
- [46] «Google Maps». Accedido: 13 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.google.es/maps/@40.3635005,-3.6884016,392m/data=!3m1!1e3?hl=es&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDQwOS4wIKXMDS0ASAFQAw%3D%3D
- [47] «Autopistam40 - M-40 - Wikipedia, la enciclopedia libre». Accedido: 13 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/M-40#/media/Archivo:Autopistam40.svg>
- [48] «Mapa de tráfico 2022 - MITMA». Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mapatrafico.transportes.gob.es/2022/>
- [49] «Tráfico. Histórico de datos del tráfico desde 2013 - Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid». Accedido: 17 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9f4b2e4b284f1a5a0/?vgnnextoid=33cb30c367e78410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD&vgnnextfmt=default>
- [50] «Criterios técnicos del mapa de tráfico», Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: [https://www.fomento.gob.es/carreteras/trafico-velocidades-accidentes-y-tramos-de-](https://www.fomento.gob.es/carreteras/trafico-velocidades-accidentes-y-tramos-de)
- [51] «Detector Inductivo de vehiculos - Aplicaciones». Accedido: 11 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://exemys.com.ar/LINKS/IDx_aplicaciones/
- [52] Dirección General de Tráfico, «DGT - detalle-cifras». Accedido: 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/Parque-de-vehiculos-Tablas-Estadisticas-2023/>
- [53] Dirección General de Tráfico, «DGT - Distintivo ambiental». Accedido: 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dgt.es/nuestros-servicios/tu-vehiculo/tus-vehiculos/distintivo-ambiental/>
- [54] «DGT - Sistemas avanzados de ayuda a la conducción (ADAS)». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/conviertete-en-un-buen-conductor/Sistemas-avanzados-de-ayuda-a-la-conduccion-ADAS/>

- [55] «Los sistemas ADAS que serán obligatorios a partir del 6 de julio de 2024 | RACE». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.race.es/sistemas-de-ayuda-a-la-conduccion>
- [56] «DGT - DGT 3.0». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/tecnologia-e-innovacion-en-carretera/dgt-3.0/>
- [57] «DGT - Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS)». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/tecnologia-e-innovacion-en-carretera/sistemas-inteligentes-de-transporte-its/>
- [58] ANFAC, «ANFAC | La antigüedad del parque de automóviles en España aumenta hasta los 14,2 años y es uno de los más envejecidos de la UE». Accedido: 18 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://anfacs.com/la-antiguedad-del-parque-de-automoviles-en-espana-aumenta-hasta-los-142-anos-y-es-uno-de-los-mas-envejecidos-de-la-ue/>
- [59] «Conjunto de Datos OTLE: Parque nacional de vehículos por comunidad autónoma, provincia, tipo de vehículo y tipo de carburante». Accedido: 19 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://apps.fomento.gob.es/BDOTLE/visorBDpop.aspx?i=396>.
- [60] «Evolución del parque automovilístico de turismos desde 1990 hasta la actualidad. | Escuela Industriales UPM Madrid». Accedido: 14 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.escuelaindustrialesupm.com/etsii-upm/evolucion-del-parque-automovilistico-de-turismos-desde-1990-hasta-la-actualidad/>
- [61] «Euro 7: aprobadas nuevas medidas para reducir las emisiones del transporte | Noticias | Parlamento Europeo». Accedido: 15 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/press-room/20240308IPR19017/euro-7-aprobadas-nuevas-medidas-para-reducir-las-emisiones-del-transporte>
- [62] RACE, «¿En qué consiste la prohibición de los coches de combustión en 2035? | RACE». Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.race.es/prohibicion-coches-diesel>
- [63] «Puntos de recarga para coche eléctrico en España: la verdad sobre cuántos hay, cuántos funcionan y cuántos llegan en 2025», Auto Bild. Accedido: 2 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.autobild.es/noticias/puntos-recarga-coche-electrico-espana-verdad-cuantos-hay-cuantos-funcionan-cuantos-llegan-2025-1436942>
- [64] A. Talebian y S. Mishra, «Predicting the adoption of connected autonomous vehicles: A new approach based on the theory of diffusion of innovations», *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 95, pp. 363-380, oct. 2018, doi: 10.1016/J.TRC.2018.06.005.
- [65] «Fuel for Thought: Waiting for Autonomy | S&P Global», S&P Global Mobility. Accedido: 3 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.spglobal.com/mobility/en/research-analysis/fuel-for-thought-waiting-for-autonomy.html>
- [66] U. Shahdah, F. Saccomanno, y B. Persaud, «Application of traffic microsimulation for evaluating safety performance of urban signalized intersections», *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 60, pp. 96-104, nov. 2015, doi: 10.1016/J.TRC.2015.06.010.
- [67] D. Gettman, L. Pu, T. Sayed, S. G. Shelby, y S. E. and Automation. B. U. I. T. Systems, «Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report», jun. 2008, doi: 10.21949/1503647.

12. Planificación Temporal y Presupuesto

12.1 Presupuesto

Para el presupuesto de este Trabajo Fin de Máster se han tenido en cuenta las horas invertidas por parte del alumno y del tutor académico, así como los costes asociados al uso del equipo informático. Asimismo, el coste de la versión académica de AIMSUN es totalmente gratuito. Los 189 días invertidos en este trabajo, teniendo en cuenta que se dedicó una media de 2 horas diarias, hacen un total de 378 horas, que entran dentro del rango recomendado de horas a dedicar teniendo en cuenta que comprende un total de 12 créditos.

	Tiempo (horas)	Coste por hora	Coste
Estudiante	378	12	4536€
Tutor Académico	20	30	600€
Equipo Informático	-	-	300€
Coste total			5436€

Tabla 20: Presupuesto del Trabajo Fin de Máster

12.2 Planificación Temporal

En este apartado se incluye la lista de tareas y un diagrama de Gantt de este Trabajo Fin de Máster, incluida la duración cada tarea en días efectivos. Nótese que la duración de cada tarea no tiene por qué coincidir con el número total de días desde su comienzo hasta su finalización, sino que es el resultado de la suma de días de duración de sus subtareas.

ID	Nombre de la Tarea	Fecha Inicio	Fecha Fin	Duración
1	Primera toma de contacto	1/12/2024	14/12/2024	14 días
2	Comprensión del programa AIMSUN, Construcción del modelo (<i>Sin definir parámetros</i>)	26/1/2025	22/2/2025	28 días
3	Revisión Bibliográfica	2/3/2025	3/5/2025	49 días
3.1	Introducción	2/3/2025	8/3/2025	7 días
3.2	Estado del arte	9/3/2025	22/3/2025	14 días
3.3	Definición de la Metodología	23/3/2025	29/3/2025	7 días
3.4	Comprensión de los modelos	6/4/2025	12/4/2025	7 días
3.5	Descripción de la autopista M-40	20/4/2025	26/4/2025	7 días
3.6	Datos del tráfico y del parque motor	27/4/2025	3/5/2025	7 días
4	Elección y def. de Modelos y parámetros	4/5/2025	24/5/2025	21 días
4.1	Modelo y parámetros elegidos	4/5/2025	10/5/2025	7 días
4.2	Predicciones del parque motor	11/5/2025	17/5/2025	7 días

4.3	Definición de calibración, escenarios y parque motor	18/5/2025	24/5/2025	7 días
5	Inicio de las simulaciones en Aimsun	8/6/2025	19/7/2025	42 días
5.1	Construcción del modelo (<i>Con parámetros definidos</i>)	8/6/2025	21/6/2025	14 días
5.2	Calibración del modelo	22/6/2025	28/6/2025	7 días
5.3	Simulación de los escenarios	29/6/2025	19/7/2025	21 días
6	Evaluación de resultados	13/7/2025	16/8/2025	21 días
6.1	Resultados por escenario	13/7/2025	26/7/2025	14 días
6.2	Conclusiones y Evaluación de Impactos	10/8/2025	16/8/2025	7 días
7	Finalización y revisión del documento	17/8/2025	30/8/2025	21 días
DURACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER		28/11/2024	30/8/2025	189 días⁸

Tabla 21: Lista de tareas del Trabajo Fin de Máster

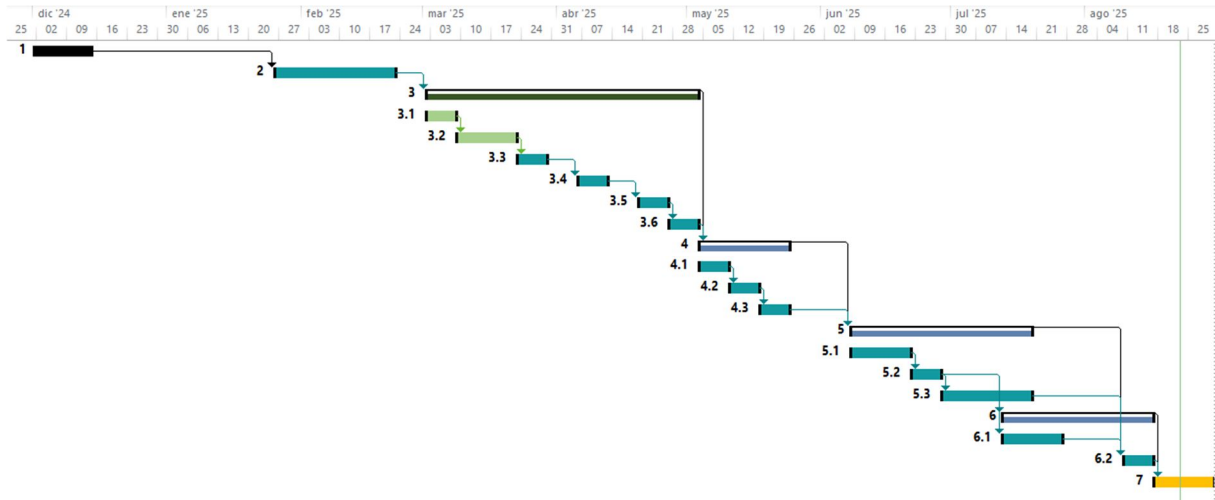


Figura 35: Diagrama de Gantt del Trabajo Fin de Máster

⁸ No tiene en cuenta el solape entre el ID 5.3 y 6.1 (7 días)

13. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible



ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura

Contribuye a la meta 9.1: “*Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos*” y a la meta 9.5: “*Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países*”.



ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles

Contribuye a la meta 11.2: “*De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial*” y a la meta 11.6: “*De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire*”.

14. Abreviaturas y Acrónimos

- **ACC:** Control de crucero adaptativo (*Adaptive Cruise Control*).
- **ADAS:** Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (*Advanced Driver Assistance Systems*).
- **CACC:** Control de crucero adaptativo conectado (*Connected Adaptive Cruise Control*).
- **CO:** Monóxido de Carbono
- **CO₂:** Dióxido de Carbono
- **GNC:** Gas Natural Comprimido
- **GNL:** Gas Natural Licuado
- **GNP:** Gas Licuado del Petróleo
- **GPS:** Sistema de Posicionamiento Global (*Global Positioning System*).
- **HEV:** Vehículo Híbrido no Enchufable (*Hybrid Electric Vehicle*).
- **LIDAR:** *Light Detection And Ranging*, tecnología de teledetección activa que utiliza rayos láser para medir distancias y crear modelos 3D precisos del terreno y objetos.
- **LTE:** Conexión inalámbrica de Largo Alcance de Conexión (*Long Term Evolution*).
- **NOx:** Óxidos de Nitrógeno
- **OBU:** Unidad de a bordo.
- **P.K.:** Punto Kilométrico.
- **PET:** Post-Encroachment Time // Tiempo de Post-Invasión (TPI).
- **PHEV:** Vehículo Híbrido Enchufable (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*).
- **Platoon lanes:** *Carril dedicado o específicamente diseñado en carreteras o autopistas para permitir la circulación de vehículos que operan en pelotones (platooning), con vehículos que circulan muy próximos entre sí.*
- **PM₁₀:** Partículas contaminantes con diámetro igual o inferior a 10 micrómetros
- **SAE:** *Society of Automotive Engineers*.
- **SSAM:** Modelo de evaluación de seguridad sustitutiva (*Surrogate Safety Assessment Model*)
- **TMC:** Centro de Gestión del Tráfico (*Traffic Management Centre*).
- **TTC:** Tiempo hasta la colisión (*Time To Collision*).
- **V2I:** Vehículo a Infraestructura (*Vehicle to Infrastructure*).
- **V2V:** Vehículo a vehículo (*Vehicle to Vehicle*).
- **V2X:** Vehículo a todo (*Vehicle to Everything 87onnectivity*).
- **VAC/CAV:** **Vehículo Automatizado y Conectado o Vehículo Autónomo Conectado // Connected and Autonomous vehicle.**
- **VANet:** Red Ad-hoc vehicular (*Vehicular Ad-Hoc Network*).
- **VOC/COV:** Compuestos Orgánicos Volátiles.

15. Anexos

Anexo A Datos de demanda según Estados de Tráfico

Listado de Acrónimos:

- *_A*: Sentido Antihorario
- *_H*: Sentido Horario
- *IXX*: Incorporación (Número respecto M-40)
- *_PKXX-XX*: Puntos kilométricos que comprende la Sección (Desde-Hasta)
- *SXX*: Salida (Número respecto M-40)
- */:* Hasta

Un porcentaje de giro del 100% implica una incorporación.

A.1 Configuración del flujo en la hora punta

name	Porcentaje de Giro	Flujo de Giro (veh/h)
I32_A/M-40_A_PK32,5-32	100	722,05
M-40_A_PK32,7-32,5/M-40_A_PK32,5-32	100	3235,95
I32_H/M-40_H_PK32,7-32,9	100	1381
M-40_A_PK32,9-32,7/M-40_A_PK32,7-32,5	85	3235,95
M-40_A_PK32,9-32,7/S32_A	15	571,05
M-40_H_PK31,7-32,7/M-40_H_PK32,7-32,9	100	4264
M-40_H_PK31,1-31,7/M-40_H_PK31,7-32,7	100	2374,4
M-40_A_PK31,4-30,8/M-40_A_PK30,8-30,4	100	3089,8
S31_A/A-5R HACIA A5	100	868,2
I31_H/M-40_H_PK31,7-32,7	100	1889,6
I31_A/M-40_A_PK30,8-30,4	100	2834,4
S31_H/A-5R HACIA A5	100	2722,8
M-40_A_PK30,8-30,4/M-40_A_PK30,4-29,5	90	5331,78
M-40_A_PK30,8-30,4/S30_A	10	592,42
M-40_H_PK30,4-31,1/M-40_H_PK31,1-31,7	100	2214,64
I30_H/M-40_H_PK31,1-31,7	100	159,76
M-40_A_PK30,4-29,5/M-40_A_PK29,5-28,7	100	5331,78
M-40_H_PK29,7-30,4/M-40_H_PK30,4-31,1	46,3539	2214,64
M-40_H_PK29,7-30,4/S31_H	53,6461	2563,04
S31_H/S31_H	100	2563,04
Desde Fortuna a Oeste/S31_H	50	159,76
Desde Fortuna a Oeste/I30_H	50	159,76
M-40_A_PK32-31,4/M-40_A_PK31,4-30,8	78,0647	3089,8
M-40_A_PK32-31,4/S31_A	21,9353	868,2
M-40_A_PK32,5-32/M-40_A_PK32-31,4	100	3958
M-40_H_PK29-29,7/S30_H	8,99657	472,32
M-40_H_PK29-29,7/M-40_H_PK29,7-30,4	91,0034	4777,68

M-40_A_PK29,5-28,7/M-40_A_PK28,7-28,3	75	4443,15
M-40_A_PK29,5-28,7/28B_AS	25	1481,05
I30_A/M-40_A_PK29,5-28,7	100	592,42
28B_HI/M-40_H_PK29-29,7	100	1312,5
M-40_H_PK28,3-29/M-40_H_PK29-29,7	100	3937,5
M-40_A_PK28,7-28,3/M-40_A_PK28,3-27,5	90	3998,83
M-40_A_PK28,7-28,3/S28A_A	10	444,315
M-40_A_PK28,3-27,5/M-40_A_PK27,5-27,3	100	3998,83
M-40_H_PK27,5-28,3/M-40_H_PK28,3-29	100	3500
I28A_H/M-40_H_PK28,3-29	100	437,5
28 ^a _AI/M-40_A_PK27,5-27,3	100	183,157
M-40_H_PK26,2-27,3/M-40_H_PK27,3-27,5	100	3846
I27_H/M-40_H_PK27,3-27,5	100	91,5
M-40_A_PK27,3-26/M-40_A_PK26-25,5	100	3573
I27_A/M-40_A_PK26-25,5	100	927
M-40_A_PK26-25,5/M-40_A_PK25,5-25	85	3825
M-40_A_PK26-25,5/S25B_A	15	675
M-40_H_PK25,3-26,2/M-40_H_PK26,2-27,3	85,4667	3846
M-40_H_PK25,3-26,2/S27_H	14,5333	654
S25B_A/S25_A	100	675
M-40_A_PK25,5-25/M-40_A_PK25-24,9	100	3825
M-40_H_PK24,9-25,3/M-40_H_PK25,3-26,2	100	3700
I25B_H/M-40_H_PK25,3-26,2	100	800
M-40_A_PK24,9-24,3/M-40_A_PK24,3-24,1	100	3582
S25A_A/A-42_N_PK6,4-6,2	100	923
I25B_A/M-40_A_PK25-24,9	100	680
M-40_H_PK24,5-24,9/M-40_H_PK24,9-25,3	100	3491,7
I25A_H/M-40_H_PK24,9-25,3	100	208,3
M-40_H_PK24,1-24,5/S25_H	37,4214	2088
M-40_H_PK24,1-24,5/M-40_H_PK24,5-24,9	62,5786	3491,7
S25_H/25B_HS	39,5115	825
S25_H/25 ^a _HS	60,4885	1263
M-40_H_PK23-24,1/M-40_H_PK24,1-24,5	92,995	5579,7
M-40_H_PK23-24,1/S24_H	7,005	420,3
M-40_A_PK24,1-23/M-40_A_PK23-22,2	84,731	4567
M-40_A_PK24,1-23/S23_A	15,269	823
I24_A/M-40_A_PK24,1-23	100	614,3
M-40_A_PK24,3-24,1/M-40_A_PK24,1-23	100	4775,7
I23_H/M-40_H_PK23-24,1	100	1300
M-40_H_PK22,3-23/M-40_H_PK23-24,1	100	4700
M-40_A_PK23-22,2/M-40_A_PK22,2-22	100	4567
I23_A/M-40_A_PK22,2-22	100	684
I22_H/M-40_H_PK22,1-22,3	100	1517
M-40_H_PK21,6-22,1/M-40_H_PK22,1-22,3	100	4400
M-40_A_PK22-21,6/M-40_A_PK21,6-21,5	100	4884

15. Anexos

I22_A/M-40_A_PK21,6-21,5	100	570
S21B_A/A-4_S_PK7,1-7,3	100	500
S21A_A/S21A_A	100	1954
M-40_A_PK21,5-21,1/M-40_A_PK21,1-20,8	100	3000
I21A_H/M-40_H_PK21,6-22,1	100	1500
M-40_H_PK21,2-21,6/M-40_H_PK21,6-22,1	100	2900
M-40_H_PK20,9-21,2/M-40_H_PK21,2-21,6	76,3602	2400
M-40_H_PK20,9-21,2/S21B_H	23,6398	743
I21_A/M-40_A_PK21,1-20,8	100	1409
I19A_H/M-40_H_PK20,5-20,9	100	1409
M-40_A_PK20,8-19/M-40_A_PK19-18,6	80	2400
M-40_A_PK20,8-19/S19_A	20	600
M-40_H_PK18,7-20,5/M-40_H_PK20,5-20,9	100	3324
M-40_A_PK19-18,6/M-40_A_PK18,6-17,8	100	2400
I19_A/M-40_A_PK18,6-17,8	100	600
M-40_A_PK18,6-17,8/M-40_A_PK17,8-16,8	100	3000
I20_A/M-40_A_PK17,8-16,8	100	1000
M-40_H_PK18,5-18,7/M-40_H_PK18,7-20,5	100	2700
I19_H/M-40_H_PK18,7-20,5	100	624
M-40_H_PK16,8-18,2/M-40_H_PK18,2-18,5	82,5	3300
M-40_H_PK16,8-18,2/19B_AS	17,5	700
M-40_A_PK17,8-16,8/M-40_A_PK16,8-16,6	84	3360
M-40_A_PK17,8-16,8/S16_A	16	640
M-40_A_PK16,8-16,6/M-40_A_PK16,6-16,2	100	3360
M-40_H_PK16,3-16,6/M-40_H_PK16,6-16,8	84	3360
M-40_H_PK16,3-16,6/S16_H	16	640
I16_H/M-40_H_PK16,8-18,2	100	640
M-40_H_PK16,6-16,8/M-40_H_PK16,8-18,2	100	3360
M-40_A_PK16,6-16,2/M-40	60	2400
M-40_A_PK16,6-16,2/S15_A	40	1600
I16_A/M-40_A_PK16,6-16,2	100	640
I15_H/M-40_H_PK16,3-16,6	100	1600
S15_A/	50	800
S15_A/S15_A_A3SUR	50	800
M-40/M-40_A_PK15,5-15,4	100	2400
M-40_H_PK15,4-16,3/M-40_H_PK16,3-16,6	100	2400
I15_A/M-40_A_PK15,5-15,4	100	1600
S15_H/S15_H_A3NORTE	50	800
S15_H/	50	800
M-40_H_PK15,4-15,5/M-40_H_PK15,4-16,3	60	2400
M-40_H_PK15,4-15,5/S15_H	40	1600
M-40_H_PK18,2-18,5/S19B_H	18,1818	600
M-40_H_PK18,2-18,5/M-40_H_PK18,5-18,7	81,8182	2700
A-5R HACIA M40/I31_A	60	2834,4
A-5R HACIA M40/I31_H	40	1889,6

25B_HS/S25_A	100	825
25 ^a _HS/A-42_N_PK6-5,7	100	1263
I21A_A/I21_A	100	666
I21B_A/I21_A	100	743
I21B_H/M-40_H_PK21,2-21,6	100	500
/	100	800
I15_A_A3NORTE/	100	800
/I15_H	100	800
I15_H_A3NORTE/I15_H	100	800
S15_H_A3SUR/	100	800
15_AI_A3SUR/	100	800
/I15_A	100	800
I15_H_A3SUR/	100	800
/	100	800
S15_A_A3NORTE/	100	800
15_HI_A3SUR/	100	800
/15_AS_A3NORTE	100	800
/15_AS_A3NORTE	100	200
S15_H_A3NORTE/	25	200
S15_H_A3NORTE/15_HS_A3NORTE	75	600
I15_A_A3SUR/I15_A	100	800
I25A_A/M-40_A_PK24,3-24,1	100	1193,7
S25_A/A-42_S_PK7-7,2	100	1500
I25B/I25B_A	45,9459	680
I25B/I25B_H	54,0541	800
A-42_N_PK6,4-6,2/A-42_N_PK6,2-6	94,3829	3500
A-42_N_PK6,4-6,2/I25A_H	5,61713	208,3
A-42_N_PK6,2-6/A-42_N_PK6-5,7	100	3500
A-42_N_PK6,7-6,4/A-42_N_PK6,4-6,2	100	2785,3
A-42_S_PK5,9-7/A-42_S_PK7-7,2	100	2887
A-42_S_PK5,7-5,9/A-42_S_PK5,9-7	66,1095	2887
A-42_S_PK5,7-5,9/I25B	33,8905	1480
A-42_N_PK7,2-6,7/A-42_N_PK6,7-6,4	70	2785,3
A-42_N_PK7,2-6,7/I25A_A	30	1193,7
S21A_H/A-4_N_PK6,3-5,9	100	1590
S21B_H/A-4_S_PK6,9-7,1	100	743
A-4_N_PK6,5-6,3/A-4_N_PK6,3-5,9	100	3519
A-4_N_PK6,9-6,5/A-4_N_PK6,5-6,3	100	1565
A-4_S_PK5,9-6,1/A-4_S_PK6,1-6,7	63,9769	2664
A-4_S_PK5,9-6,1/I21A_H	36,0231	1500
I21A_H/I21A_H	100	1500
S21A_A/A-4_N_PK6,5-6,3	100	1954
A-4_S_PK6,1-6,7/A-4_S_PK6,7-6,9	75	1998
A-4_S_PK6,1-6,7/I21A_A	25	666
A-4_S_PK6,7-6,9/A-4_S_PK6,9-7,1	100	1998

15. Anexos

A-4_S_PK6,9-7,1/A-4_S_PK7,1-7,3	100	2741
I21B/I21B_A	59,7747	743
I21B/I21B_H	40,2253	500
A-4_N_PK7,1-6,9/A-4_N_PK6,9-6,5	55,7336	1565
A-4_N_PK7,1-6,9/I21B	44,2664	1243
/I15_HS_A3SUR	50	800
/I15_A_A3NORTE	50	800
/	50	800
/I15_H_A3SUR	50	800
/	50	800
/S15_A_A3NORTE	50	800
/	50	800
/S15_H_A3SUR	50	800
M-40_A_PK21,6-21,5/S21B_A	9,16758	500
M-40_A_PK21,6-21,5/M-40_A_PK21,5-21,1	55,0055	3000
M-40_A_PK21,6-21,5/S21A_A	35,8269	1954
M-40_A_PK21,1-20,8/M-40_A_PK20,8-19	68,0426	3000
M-40_A_PK21,1-20,8/S20_A	31,9574	1409
M-40_H_PK20,5-20,9/S21A_H	33,5939	1590
M-40_H_PK20,5-20,9/M-40_H_PK20,9-21,2	66,4061	3143
M-40_A_PK25-24,9/M-40_A_PK24,9-24,3	79,5117	3582
M-40_A_PK25-24,9/S25A_A	20,4883	923
M-40_H_PK22,1-22,3/S23_H	20,5679	1217
M-40_H_PK22,1-22,3/M-40_H_PK22,3-23	79,4321	4700
M-40_A_PK22,2-22/M-40_A_PK22-21,6	93,0109	4884
M-40_A_PK22,2-22/S22_A	6,98914	367
M-40_H_PK27,3-27,5/28 ^a _HS	11,1111	437,5
M-40_H_PK27,3-27,5/M-40_H_PK27,5-28,3	88,8889	3500
M-40_A_PK27,5-27,3/M-40_A_PK27,3-26	85,4379	3573
M-40_A_PK27,5-27,3/S27_A	14,5621	608,987

Tabla 22: Configuración de flujo en hora punta

A.2 Configuración del flujo en la hora valle

name	Porcentaje de Giro	Flujo de Giro (veh/h)
I32_A/M-40_A_PK32,5-32	100	131,25
M-40_A_PK32,7-32,5/M-40_A_PK32,5-32	100	2477,75
I32_H/M-40_H_PK32,7-32,9	100	330
M-40_A_PK32,9-32,7/M-40_A_PK32,7-32,5	85	2477,75
M-40_A_PK32,9-32,7/S32_A	15	437,25
M-40_H_PK31,7-32,7/M-40_H_PK32,7-32,9	100	3000
M-40_H_PK31,1-31,7/M-40_H_PK31,7-32,7	100	1547
M-40_A_PK31,4-30,8/M-40_A_PK30,8-30,4	100	2100
S31_A/A-5R HACIA A5	100	509

I31_H/M-40_H_PK31,7-32,7	100	1453
I31_A/M-40_A_PK30,8-30,4	100	2400
S31_H/A-5R HACIA A5	100	2902
M-40_A_PK30,8-30,4/M-40_A_PK30,4-29,5	90	4050
M-40_A_PK30,8-30,4/S30_A	10	450
M-40_H_PK30,4-31,1/M-40_H_PK31,1-31,7	100	1400
I30_H/M-40_H_PK31,1-31,7	100	147
M-40_A_PK30,4-29,5/M-40_A_PK29,5-28,7	100	4050
M-40_H_PK29,7-30,4/M-40_H_PK30,4-31,1	33,7431	1400
M-40_H_PK29,7-30,4/S31_H	66,2569	2749
S31_H/S31_H	100	2749
Desde Fortuna a Oeste/S31_H	49	147
Desde Fortuna a Oeste/I30_H	51	153
M-40_A_PK32-31,4/M-40_A_PK31,4-30,8	80,4906	2100
M-40_A_PK32-31,4/S31_A	19,5094	509
M-40_A_PK32,5-32/M-40_A_PK32-31,4	100	2609
M-40_H_PK29-29,7/S30_H	8,81319	401
M-40_H_PK29-29,7/M-40_H_PK29,7-30,4	91,1868	4149
M-40_A_PK29,5-28,7/M-40_A_PK28,7-28,3	80	3600
M-40_A_PK29,5-28,7/28B_AS	20	900
I30_A/M-40_A_PK29,5-28,7	100	450
28B_HI/M-40_H_PK29-29,7	100	1050
M-40_H_PK28,3-29/M-40_H_PK29-29,7	100	3500
M-40_A_PK28,7-28,3/M-40_A_PK28,3-27,5	90	3240
M-40_A_PK28,7-28,3/S28A_A	10	360
M-40_A_PK28,3-27,5/M-40_A_PK27,5-27,3	100	3240
M-40_H_PK27,5-28,3/M-40_H_PK28,3-29	100	3150
I28A_H/M-40_H_PK28,3-29	100	350
28A_AI/M-40_A_PK27,5-27,3	100	360
M-40_H_PK26,2-27,3/M-40_H_PK27,3-27,5	100	3402
I27_H/M-40_H_PK27,3-27,5	100	98
M-40_A_PK27,3-26/M-40_A_PK26-25,5	100	3331
I27_A/M-40_A_PK26-25,5	100	769
M-40_A_PK26-25,5/M-40_A_PK25,5-25	84,1463	3450
M-40_A_PK26-25,5/S25B_A	15,8537	650
M-40_H_PK25,3-26,2/M-40_H_PK26,2-27,3	82,9756	3402
M-40_H_PK25,3-26,2/S27_H	17,0244	698
S25B_A/S25_A	100	650
M-40_A_PK25,5-25/M-40_A_PK25-24,9	100	3450
M-40_H_PK24,9-25,3/M-40_H_PK25,3-26,2	100	3400
I25B_H/M-40_H_PK25,3-26,2	100	700
M-40_A_PK24,9-24,3/M-40_A_PK24,3-24,1	100	3204
S25A_A/A-42_N_PK6,4-6,2	100	800
I25B_A/M-40_A_PK25-24,9	100	554
M-40_H_PK24,5-24,9/M-40_H_PK24,9-25,3	100	3200

15. Anexos

I25A_H/M-40_H_PK24,9-25,3	100	200
M-40_H_PK24,1-24,5/S25_H	32,4895	1540
M-40_H_PK24,1-24,5/M-40_H_PK24,5-24,9	67,5106	3200
S25_H/25B_HS	51,8831	799
S25_H/25A_HS	48,1169	741
M-40_H_PK23-24,1/M-40_H_PK24,1-24,5	86,1818	4740
M-40_H_PK23-24,1/S24_H	13,8182	760
M-40_A_PK24,1-23/M-40_A_PK23-22,2	85,469	4529
M-40_A_PK24,1-23/S23_A	14,531	770
I24_A/M-40_A_PK24,1-23	100	1034
M-40_A_PK24,3-24,1/M-40_A_PK24,1-23	100	4265
I23_H/M-40_H_PK23-24,1	100	1000
M-40_H_PK22,3-23/M-40_H_PK23-24,1	100	4500
M-40_A_PK23-22,2/M-40_A_PK22,2-22	100	4529
I23_A/M-40_A_PK22,2-22	100	471
I22_H/M-40_H_PK22,1-22,3	100	1381
M-40_H_PK21,6-22,1/M-40_H_PK22,1-22,3	100	4040
M-40_A_PK22-21,6/M-40_A_PK21,6-21,5	100	4617
I22_A/M-40_A_PK21,6-21,5	100	383
S21B_A/A-4_S_PK7,1-7,3	100	500
S21A_A/S21A_A	100	1500
M-40_A_PK21,5-21,1/M-40_A_PK21,1-20,8	100	3000
I21A_H/M-40_H_PK21,6-22,1	100	1140
M-40_H_PK21,2-21,6/M-40_H_PK21,6-22,1	100	2900
M-40_H_PK20,9-21,2/M-40_H_PK21,2-21,6	81,2333	2437
M-40_H_PK20,9-21,2/S21B_H	18,7667	563
I21_A/M-40_A_PK21,1-20,8	100	1157
I19A_H/M-40_H_PK20,5-20,9	100	1156
M-40_A_PK20,8-19/M-40_A_PK19-18,6	80	2400
M-40_A_PK20,8-19/S19_A	20	600
M-40_H_PK18,7-20,5/M-40_H_PK20,5-20,9	100	2550
M-40_A_PK19-18,6/M-40_A_PK18,6-17,8	100	2400
I19_A/M-40_A_PK18,6-17,8	100	400
M-40_A_PK18,6-17,8/M-40_A_PK17,8-16,8	100	2800
I20_A/M-40_A_PK17,8-16,8	100	400
M-40_H_PK18,5-18,7/M-40_H_PK18,7-20,5	100	2000
I19_H/M-40_H_PK18,7-20,5	100	550
M-40_H_PK16,8-18,2/M-40_H_PK18,2-18,5	81,25	2600
M-40_H_PK16,8-18,2/19B_AS	18,75	600
M-40_A_PK17,8-16,8/M-40_A_PK16,8-16,6	84	2688
M-40_A_PK17,8-16,8/S16_A	16	512
M-40_A_PK16,8-16,6/M-40_A_PK16,6-16,2	100	2688
M-40_H_PK16,3-16,6/M-40_H_PK16,6-16,8	84	2688
M-40_H_PK16,3-16,6/S16_H	16	512
I16_H/M-40_H_PK16,8-18,2	100	512

M-40_H_PK16,6-16,8/M-40_H_PK16,8-18,2	100	2688
M-40_A_PK16,6-16,2/M-40	60	1920
M-40_A_PK16,6-16,2/S15_A	40	1280
I16_A/M-40_A_PK16,6-16,2	100	512
I15_H/M-40_H_PK16,3-16,6	100	1280
S15_A/	50	640
S15_A/S15_A_A3SUR	50	640
M-40/M-40_A_PK15,5-15,4	100	1920
M-40_H_PK15,4-16,3/M-40_H_PK16,3-16,6	100	1920
I15_A/M-40_A_PK15,5-15,4	100	1280
S15_H/S15_H_A3NORTE	50	640
S15_H/	50	640
M-40_H_PK15,4-15,5/M-40_H_PK15,4-16,3	60	1920
M-40_H_PK15,4-15,5/S15_H	40	1280
M-40_H_PK18,2-18,5/S19B_H	23,0769	600
M-40_H_PK18,2-18,5/M-40_H_PK18,5-18,7	76,9231	2000
A-5R HACIA M40/I31_A	62,2891	2400
A-5R HACIA M40/I31_H	37,7109	1453
25B_HS/S25_A	100	799
25A_HS/A-42_N_PK6-5,7	100	741
I21A_A/I21_A	100	620
I21B_A/I21_A	100	537
I21B_H/M-40_H_PK21,2-21,6	100	463
/	100	640
I15_A_A3NORTE/	100	640
/I15_H	100	640
I15_H_A3NORTE/I15_H	100	640
S15_H_A3SUR/	100	640
15_AI_A3SUR/	100	640
/I15_A	100	640
I15_H_A3SUR/	100	640
/	100	640
S15_A_A3NORTE/	100	640
15_HI_A3SUR/	100	640
/15_AS_A3NORTE	100	640
/15_AS_A3NORTE	100	160
S15_H_A3NORTE/	25	160
S15_H_A3NORTE/15_HS_A3NORTE	75	480
I15_A_A3SUR/I15_A	100	640
I25A_A/M-40_A_PK24,3-24,1	100	1061
S25_A/A-42_S_PK7-7,2	100	1449
I25B/I25B_A	44,1786	554
I25B/I25B_H	55,8214	700
A-42_N_PK6,4-6,2/A-42_N_PK6,2-6	93,3333	2800
A-42_N_PK6,4-6,2/I25A_H	6,66667	200

15. Anexos

A-42_N_PK6,2-6/A-42_N_PK6-5,7	100	2800
A-42_N_PK6,7-6,4/A-42_N_PK6,4-6,2	100	2200
A-42_S_PK5,9-7/A-42_S_PK7-7,2	100	2500
A-42_S_PK5,7-5,9/A-42_S_PK5,9-7	66,5956	2500
A-42_S_PK5,7-5,9/I25B	33,4044	1254
A-42_N_PK7,2-6,7/A-42_N_PK6,7-6,4	67,464	2200
A-42_N_PK7,2-6,7/I25A_A	32,536	1061
S21A_H/A-4_N_PK6,3-5,9	100	706
S21B_H/A-4_S_PK6,9-7,1	100	563
A-4_N_PK6,5-6,3/A-4_N_PK6,3-5,9	100	3235
A-4_N_PK6,9-6,5/A-4_N_PK6,5-6,3	100	1735
A-4_S_PK5,9-6,1/A-4_S_PK6,1-6,7	68,4473	2473
A-4_S_PK5,9-6,1/I21A_H	31,5527	1140
I21A_H/I21A_H	100	1140
S21A_A/A-4_N_PK6,5-6,3	100	1500
A-4_S_PK6,1-6,7/A-4_S_PK6,7-6,9	74,9292	1853
A-4_S_PK6,1-6,7/I21A_A	25,0708	620
A-4_S_PK6,7-6,9/A-4_S_PK6,9-7,1	100	1853
A-4_S_PK6,9-7,1/A-4_S_PK7,1-7,3	100	2416
I21B/I21B_A	53,7	537
I21B/I21B_H	46,3	463
A-4_N_PK7,1-6,9/A-4_N_PK6,9-6,5	63,4369	1735
A-4_N_PK7,1-6,9/I21B	36,5631	1000
/I15_HS_A3SUR	50	640
/I15_A_A3NORTE	50	640
/	50	640
/I15_H_A3SUR	50	640
/	50	640
/S15_A_A3NORTE	50	640
/	50	640
/S15_H_A3SUR	50	640
M-40_A_PK21,6-21,5/S21B_A	10	500
M-40_A_PK21,6-21,5/M-40_A_PK21,5-21,1	60	3000
M-40_A_PK21,6-21,5/S21A_A	30	1500
M-40_A_PK21,1-20,8/M-40_A_PK20,8-19	72,1674	3000
M-40_A_PK21,1-20,8/S20_A	27,8326	1157
M-40_H_PK20,5-20,9/S21A_H	19,0502	706
M-40_H_PK20,5-20,9/M-40_H_PK20,9-21,2	80,9498	3000
M-40_A_PK25-24,9/M-40_A_PK24,9-24,3	80,02	3204
M-40_A_PK25-24,9/S25A_A	19,98	800
M-40_H_PK22,1-22,3/S23_H	16,9895	921
M-40_H_PK22,1-22,3/M-40_H_PK22,3-23	83,0105	4500
M-40_A_PK22,2-22/M-40_A_PK22-21,6	92,34	4617
M-40_A_PK22,2-22/S22_A	7,66	383
M-40_H_PK27,3-27,5/28A_HS	10	350

M-40_H_PK27,3-27,5/M-40_H_PK27,5-28,3	90	3150
M-40_A_PK27,5-27,3/M-40_A_PK27,3-26	92,5278	3331
M-40_A_PK27,5-27,3/S27_A	7,47222	269

Tabla 23: Configuración de flujo en hora valle

Anexo B Resultados

En este anexo se adjuntan los resultados detallados obtenidos para cada variable y escenario.

B.1 Resultados de Aforo y Contaje

B.1.1 En horas punta

ESCENARIOS	Contaje de entrada	Densidad (veh/km)
A	46284	14,07
B	46601	14,01
C	46440	12,7
D	46452	13,49
E	46495	13,21
E CACC	46971	13,48
F	46447	13,03
F CACC	46738	13,31
G	46759	13,05
G CACC	46306	12,88
H	46457	13
H CACC	46501	13,11
MEDIA	46537,5833	13,2783333
DESVESTANDAR	198,562314	0,4227579

Tabla 24: Resultados de aforo y contaje en hora punta

B.1.2 En horas valle

ESCENARIOS	Contaje de entrada	Densidad (veh/km)
A	37654	11,57
B	37498	11,03
C	37736	11,06
D	37636	10,48
E	37484	10,81
E CACC	37364	10,85
F	37462	10,32
F CACC	37334	10,8
G	37586	11
G CACC	37667	10,89
H	38028	11,12
H CACC	37495	10,73

MEDIA	37578,6667	10,8883333
DESVESTANDAR	187,203503	0,31774299

Tabla 25: Resultados de aforo y contaje en hora valle

B.2 Resultados de Tiempo y Velocidad

ESCENARIOS	TIEMPO TOTAL DE VIAJE (s/km)	TIEMPO DE PARADA (s/km)	VELOCIDAD (km/h)	TIEMPO DE DEMORA (s/km)
A PUNTA	48,45	0,6	76,89	8,65
A VALLE	46,2	0,68	79,95	6,65
B PUNTA	48,59	0,37	77	8,76
B VALLE	45,14	0,39	81,47	5,51
C PUNTA	46,74	0,29	78,88	6,67
C VALLE	45,21	0,42	81,42	5,4
D PUNTA	47,59	0,76	78,11	7,25
D VALLE	45,13	0,35	81,4	4,95
E PUNTA	46,89	0,37	78,71	6
E PUNTA CACC	47,27	0,48	78,21	6,32
E VALLE	45,12	0,23	81,32	4,4
E VALLE CACC	45,12	0,26	81,33	4,4
F PUNTA	46,79	0,26	78,75	4,88
F PUNTA CACC	46,87	0,23	78,53	5
F VALLE	45,22	0,16	81,04	3,56
F VALLE CACC	45,18	0,16	81,12	3,61
G PUNTA	46,57	0,13	78,86	4,07
G PUNTA CACC	46,53	0,14	78,96	4,04
G VALLE	45,38	0,1	80,63	3,16
G VALLE CACC	45,33	0,1	80,73	3,11
H PUNTA	46,41	0,11	79,06	3,84
H PUNTA CACC	46,46	0,13	79	3,94
H VALLE	45,45	0,11	80,5	3,12
H VALLE CACC	45,28	0,1	80,78	2,94

Tabla 26: Resultados de tiempo y velocidad

B.3 Resultados de Conflictos

ESCENARIOS	Nº CONFLICTOS ALTA PELIGROSIDAD	Nº GIROS PERDIDOS	Nº CAMBIOS CARRIL
A PUNTA	1018	351	398569
A VALLE	777	221	345601
B PUNTA	921	361	411048
B VALLE	690	271	343633
C PUNTA	901	388	373617
C VALLE	738	261	334997
D PUNTA	924	444	387656
D VALLE	628	244	282259
E PUNTA	901	363	336579
E PUNTA CACC	912	406	343504
E VALLE	627	236	272631
E VALLE CACC	624	252	273967
F PUNTA	755	342	265969
F PUNTA CACC	881	343	274936
F VALLE	537	180	201215
F VALLE CACC	564	182	219206
G PUNTA	717	230	226911
G PUNTA CACC	802	257	225531
G VALLE	558	158	190194
G VALLE CACC	604	164	189868
H PUNTA	741	253	220164
H PUNTA CACC	719	236	222262
H VALLE	603	163	188594
H VALLE CACC	539	172	182446

Tabla 27: Resultados de conflictos

B.4 Resultados de Emisiones, según previsiones del parque motor

ESCENARIOS (Emisiones en g/km)	CO COPERT	NOx COPERT	PM ₁₀ COPERT	CO ₂ PANIS	NOx PANIS	PM ₁₀ PANIS	VOC PANIS	CO ₂ LONDON
A punta	6436	4111	158	645683	2462	167	306	447070
A valle	5349	3586	139	550535	2200	133	250	385421
B punta	3851	2593	105	605451	2455	155	265	405711
B valle	3161	2261	88	494818	2044	112	213	347197
C punta	3230	2269	89	535789	2192	133	229	355327
C valle	2699	1961	78	465748	1956	103	198	323812
D punta	2468	1773	72	502270	2094	121	214	327801
D valle	2096	1545	62	385956	1635	80	167	268725
E punta	1508	1123	45	368420	1561	78	160	247333
E punta cacc	1554	1153	46	378666	1607	81	164	251338
E valle	1340	1007	39	303951	1301	58	134	209772
E valle cacc	1286	980	41	307101	1349	57	135	213004
F punta	450	352	15	178448	772	33	79	116014
F punta cacc	484	370	16	190654	835	35	84	120432
F valle	396	313	14	147660	671	24	64	95048
F valle cacc	404	313	13	151452	669	25	67	98588
G punta	28	20	1	28726	125	5	13	15651
G punta cacc	27	20	1	29854	137	5	13	15025
G valle	22	17	1	24385	113	4	11	12907
G valle cacc	22	16	1	24149	107	4	11	12443
H punta	0	0	0	0	0	0	0	0
H punta cacc	0	0	0	0	0	0	0	0
H valle	0	0	0	0	0	0	0	0
H valle cacc	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 28: Resultados de emisiones en g/km según previsiones del parque motor

B.5 Resultados de Emisiones imputables a la automatización

B.5.1 En hora Punta

ESCENARIO <i>(Emisiones en g/km)</i>	CO PUNTA		CO2 PUNTA		NOX PUNTA		PM10 PUNTA		VOC PUNTA	
	Cantidad	Dif %	Cantidad	Dif %	Cantidad	Dif %	Cantidad	Dif %	Cantidad	Dif %
A (Ref.)	6436,47	0,00%	645683,16	0,00%	2461,89	0,00%	167,1	0,00%	305,83	0,00%
B	6413,19	-0,36%	647633,25	0,30%	2510,89	1,99%	159,2	-4,73%	301,85	-1,30%
C	6337,37	-1,54%	602896,17	-6,63%	2350,9	-4,51%	140,68	-15,81%	278,38	-8,98%
D	6224,12	-3,30%	624091,11	-3,34%	2445,7	-0,66%	141,21	-15,49%	292,64	-4,31%
E	6237,99	-3,08%	598564,49	-7,30%	2400,34	-2,50%	118,58	-29,04%	287,77	-5,91%
E CACC	6335,04	-1,58%	605021,39	-6,30%	2402,42	-2,42%	121,25	-27,44%	293,91	-3,90%
F	6156,24	-4,35%	557743,44	-13,62%	2253,15	-8,48%	95,17	-43,05%	286,24	-6,41%
F CACC	6281,61	-2,41%	568470,14	-11,96%	2275,11	-7,59%	98,6	-40,99%	291,99	-4,53%
G	6111,54	-5,05%	537788,27	-16,71%	2174,19	-11,69%	84,21	-49,61%	287,32	-6,05%
G CACC	6123,26	-4,87%	529055,14	-18,06%	2129,95	-13,48%	82,33	-50,73%	284,28	-7,05%
H	6138,92	-4,62%	533857,44	-17,32%	2142,7	-12,97%	83,11	-50,26%	286,97	-6,17%
H CACC	6140,99	-4,59%	536429,37	-16,92%	2168,93	-11,90%	83,87	-49,81%	287,12	-6,12%

Tabla 29: Resultados de emisiones en g/km imputables a la automatización en hora punta

B.5.2 En hora Valle

ESCENARIO <i>(Emisiones en g/km)</i>	CO VALLE		CO2 VALLE		NOX VALLE		PM10 VALLE		VOC VALLE	
	Cantidad	Dif. %	Cantidad	Dif. %	Cantidad	Dif. %	Cantidad	Dif. %	Cantidad	Dif. %
A (Ref.)	5349,31	0,00%	550534,62	0,00%	2199,68	0,00%	132,66	0,00%	249,55	0,00%
B	5214,25	-2,52%	525460,07	-4,55%	2077,66	-5,55%	114,54	-13,66%	240,55	-3,61%
C	5235,30	-2,13%	526056,71	-4,45%	2116,31	-3,79%	110,31	-16,85%	240,58	-3,59%
D	5206,54	-2,67%	482792,2	-12,30%	1944,53	-11,60%	94,53	-28,74%	227,84	-8,70%
E	5133,34	-4,04%	485447,08	-11,82%	1973,94	-10,26%	86,07	-35,12%	236,15	-5,37%
E CACC	5162,25	-3,50%	491094,26	-10,80%	2022,35	-8,06%	84,6	-36,23%	238,44	-4,45%
F	5169,15	-3,37%	438284,95	-20,39%	1795,05	-18,39%	65,98	-50,26%	228,66	-8,37%
F CACC	5110,08	-4,47%	464715,89	-15,59%	1909,33	-13,20%	71,04	-46,45%	238,11	-4,58%
G	5163,80	-3,47%	450872,1	-18,10%	1866,78	-15,13%	62,98	-52,53%	243,75	-2,32%
G CACC	5208,53	-2,63%	448262,47	-18,58%	1817,59	-17,37%	64,34	-51,50%	238,68	-4,36%
H	5249,57	-1,86%	456432,02	-17,09%	1877,84	-14,63%	65,92	-50,31%	243,31	-2,50%
H CACC	5101,28	-4,64%	433875,34	-21,19%	1759,98	-19,99%	58,59	-55,83%	238,45	-4,45%

Tabla 30: Resultados de emisiones en g/km imputables a la automatización en hora valle