

JUAN ANTONIO FERNÁNDEZ DEL CAMPO

**Premio internacional
A LA INNOVACIÓN EN CARRETERAS**

ACCESIT- Texto completo

Medidas de gestión para aumentar la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas.

Autores:

Sara Moll. Investigadora postdoctoral del Instituto del Transporte y el Territorio. Universidad Politécnica de Valencia (España).

Griselda López. Profesora titular del departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes de la Universidad Politécnica de Valencia (España).

Alfredo García. Catedrático del departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes de la Universidad Politécnica de Valencia (España).

Índice de Contenidos

1	Introducción.....	3
1.1	Necesidad de investigación.....	6
1.2	Objetivos.....	6
2	Metodología.....	7
2.1	Tramo de carretera en el que se ha desarrollado el estudio.....	7
2.2	Observación del fenómeno.....	8
2.3	Microsimulación del tráfico	9
2.4	Diseño de escenarios de tráfico	11
2.5	Medidas de gestión	12
2.5.1	MG1: Gestión de la velocidad límite de la carretera	12
2.5.2	MG2: Gestión de la velocidad durante el adelantamiento	12
2.5.3	MG3: Gestión del tráfico: tamaño y configuración del grupo de ciclistas.....	13
2.6	Caracterización de la seguridad y la funcionalidad del tráfico	13
3	Resultados	14
3.1	Modelo de microsimulación del tráfico	15
3.1.1	Observaciones en campo: datos para calibración y validación del modelo.....	15
3.1.2	Calibración y validación.....	17
3.1.3	Diseño de escenarios de tráfico	19
3.2	Medidas de gestión	21
3.2.1	MG1: Gestión de la velocidad límite de la carretera	21
3.2.2	MG2: Gestión de la velocidad durante el adelantamiento	25
3.2.3	MG3: Gestión del tráfico: tamaño y configuración del grupo de ciclistas.....	30
4	Aplicaciones de la investigación	34
4.1	Recomendaciones de gestión en carreteras convencionales estrechas con tráfico ciclista.	34
4.2	Guía metodológica para la implementación de la investigación en otros tramos de carretera	36
5	Conclusiones.....	39
6	Agradecimientos.....	40
7	Referencias	40

1 Introducción

Este trabajo de investigación está centrado en la evaluación de medidas de gestión de la infraestructura y del tráfico que permitan mejorar tanto la seguridad como la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales donde es habitual la circulación de ciclistas deportivos.

La problemática que se pretende resolver es la derivada de la circulación mixta de vehículos motorizados y bicicletas en carreteras convencionales. El ciclismo de carretera es un deporte habitual en España, donde el ciclismo es el segundo deporte más practicado según los datos de la encuesta de hábitos deportivos del Ministerio de Cultura y Deporte (Ministerio de Cultura y Deporte, 2021b). En 2020, el número de ciclistas y clubes federados en España fue de 75,638 y de 3,634 respectivamente (Ministerio de Cultura y Deporte, 2021a). Este dato, junto con la dimensión de las carreteras convencionales, que representan el 90% de la red de carreteras en España (Dirección General de Tráfico, 2020), ofrecen una perspectiva de la magnitud del fenómeno.

La circulación mixta de estos dos tipos de usuarios en las carreteras genera una mayor accidentalidad en estas vías, con efectos mayoritariamente sobre el colectivo ciclista, que es el que menor nivel de protección presenta. En 2020, fallecieron 50 ciclistas en vías interurbanas, dos más que en 2019, mientras que el número de ciclistas hospitalizados fue de 325 (Dirección General de Tráfico, 2020). En los últimos años el número de ciclistas fallecidos se ha estancado alrededor de 50 ciclistas por año, reflejando la necesidad de implementar actuaciones que reduzcan esta cifra.

La circulación mixta de ciclistas y conductores en carreteras convencionales, considerando sus diferencias sobre todo en velocidad y nivel de protección, genera interacciones potencialmente peligrosas entre estos dos tipos de usuarios. La principal interacción que se produce entre ellos es la maniobra de adelantamiento de los vehículos motorizados a las bicicletas. En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios sobre la maniobra de adelantamiento a ciclistas, la gran mayoría desde el punto de vista de la seguridad, enfocados en el análisis de la separación lateral y la velocidad del vehículo adelantante durante la maniobra.

Sin embargo, la circulación mixta de bicicletas y vehículos motorizados también afecta a la funcionalidad del tráfico, generando una mayor demanda de adelantamientos, y pudiendo generar colas y demoras. Este efecto sobre la funcionalidad del tráfico producido por la circulación mixta de vehículos a motor y bicicletas en vías interurbanas es un aspecto que requiere una mayor investigación. Por otra parte, el estudio de maniobras de adelantamiento considerando a ciclistas circulando en grupo es muy limitado, y la habitual circulación de grupos de ciclistas por vías interurbanas hace necesario ampliar el conocimiento considerando grupos de ciclistas.

Este uso de las carreteras por parte de los ciclistas crea un nuevo modelo de circulación, donde deben convivir diferentes usuarios y adaptarse unos a otros. La circulación de bicicletas y su interacción con vehículos a motor en carreteras convencionales está regulada en España por el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003). Según el Reglamento, las bicicletas deben circular por el arcén, si existe, o lo más próximas al borde derecho de la calzada. Se permite la circulación de

dos ciclistas en paralelo siempre que exista visibilidad suficiente. Los vehículos motorizados deben guardar una distancia lateral de 1.5 m al adelantar a ciclistas, pudiendo invadir el sentido contrario siempre que se disponga de visibilidad suficiente.

Por otra parte, las políticas que fomentan el uso de la bicicleta están en auge en las últimas décadas a nivel mundial. El uso de la bicicleta, como medio de transporte y como herramienta para practicar deporte, está ligado al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Organización de Naciones Unidas, 2015). Según la Organización de Naciones Unidas (ONU) y la Red de Ciudades por la Bicicleta, fomentar la movilidad en bicicleta ayuda a conseguir 12 de los 17 ODS de la ONU. Por tanto, son muchos los países que se plantean fomentar el uso de la bicicleta y del ciclismo debido a sus beneficios para la salud humana y para el medio ambiente.

En este sentido en España la Dirección General de Tráfico ha publicado la Estrategia Estatal por la Bicicleta (Dirección General de Tráfico, 2019), en la que han colaborado cinco Ministerios y varios organismos, y que tiene como objetivo impulsar la bicicleta en todos sus ámbitos. Esta Estrategia define cinco prioridades para el periodo 2020-2025: conseguir un cambio modal a la bicicleta, promover la vida saludable de las personas, fomentar y proteger el ocio y el deporte en bicicleta, aprovechar el potencial del turismo en bicicleta y coordinar la acción del Estado. La presente investigación se engloba dentro de los objetivos de estas políticas, generando un entorno más seguro y eficaz para conductores y ciclistas en las carreteras convencionales.

Teniendo en cuenta aspectos relativos a la seguridad y a la funcionalidad del tráfico mixto en carreteras convencionales, se deben de implantar medidas que mejoren estos dos aspectos, o en el peor de los casos, mejoren uno sin comprometer el otro. Aquí surge la necesidad de implementar una metodología que permita caracterizar el fenómeno, evaluando la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas. En la actualidad la metodología que se utiliza para caracterizar el nivel de servicio de una carretera convencional es la definida en el Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2022), sin embargo, en este manual no se contempla la circulación mixta de ciclistas y conductores en este tipo de vías. Por tanto, es necesario definir una metodología que ataje el problema, definiendo medidas de desempeño que sean sensibles al fenómeno analizado, siendo este aspecto parte del reto que se abarca en la presente investigación.

Existen diversas medidas de gestión de la infraestructura y del tráfico que pueden ser implementadas, pero su efecto sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico debe de ser analizado con anterioridad a su implantación para evitar efectos no deseados. Una herramienta que permite analizar los efectos de estas medidas es la microsimulación del tráfico. Sin embargo, para obtener resultados fiables es necesario que el modelo de microsimulación represente fielmente el fenómeno, incorporando las características de los dos tipos de usuarios y sus interacciones, y que esté debidamente calibrado y validado con observaciones de campo.

Esta investigación se basa en una serie de observaciones de campo realizadas con el fin de caracterizar el tráfico ciclista y su interacción con el tráfico motorizado en carretera. En concreto se ha basado en

dos metodologías de tomas de datos: las bicicletas instrumentadas y las grabaciones estáticas simultáneas en los extremos del tramo de carretera. Mediante el uso de bicicletas instrumentadas se ha caracterizado la maniobra de adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas, registrando datos de separaciones laterales, velocidades durante la maniobra y duraciones. Por otra parte, las grabaciones simultáneas en los extremos del tramo de carretera han aportado datos de tráfico a nivel macroscópico, caracterizando la intensidad del tráfico y la velocidad media de recorrido de cada tipo de usuario.

La microsimulación del tráfico es una herramienta que permite representar el movimiento de cada usuario de la vía considerado individualmente, y obtener datos de trayectorias y comportamiento de cada uno de ellos. Esto implica modelizar las acciones (aceleración, velocidad, cambio de carril) de cada usuario en función del tráfico que le rodea (Barceló, 2010). En las últimas décadas han evolucionado considerablemente las tecnologías informáticas y la ingeniería en programas de microsimulación de tráfico, alcanzando unos niveles elevados de detalle y de aproximación a las observaciones realizadas en las carreteras reales.

Los programas de microsimulación del tráfico disponibles en la actualidad permiten la simulación de bicicletas en entornos urbanos, incluyendo el movimiento lateral en el carril de circulación. Sin embargo, ninguno de ellos es capaz, por el momento, de simular el comportamiento observado en las interacciones de ciclistas y conductores en carreteras convencionales, compatibilizando los modelos bidireccional, que permite la interacción con el tráfico opuesto en carreteras convencionales, y bidimensional, que permite el movimiento lateral dentro del carril de circulación. De hecho, en general ninguno de los microsimuladores de tráfico disponibles actualmente dispone de un módulo específico que permita la simulación de carreteras convencionales con tráfico ciclista y motorizados contemplando sus interacciones. No obstante, este comportamiento puede ser simulado correctamente incorporando algunas adaptaciones al modelo existente (Moll, López, & García, 2021). Por tanto, la microsimulación del tráfico ha evolucionado enormemente en los últimos años, convirtiéndose en una herramienta con un elevado potencial.

En esta investigación se ha adaptado un modelo de microsimulación del tráfico a la circulación mixta de ciclistas y conductores, y sus interacciones, en carreteras convencionales. Esta adaptación, calibración y validación del modelo se ha basado en datos reales observados en carretera.

El uso del modelo de microsimulación del tráfico permite obtener medidas de desempeño que caractericen el tráfico de manera rápida y eficaz, permitiendo registrar un mayor número de variables que en las observaciones de campo. También permiten simular variaciones en la geometría, en el nivel del tráfico o en las regulaciones normativas, y así evaluar los efectos sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico de diferentes medidas de gestión sin comprometer la seguridad de los usuarios reales.

1.1 Necesidad de investigación

Actualmente en las carreteras convencionales conviven conductores y ciclistas que deben de interactuar, resultando estas interacciones en muchos casos en un aumento de la siniestralidad sobretodo del colectivo ciclista que es el más vulnerable. Estas interacciones también resultan en una afección a la funcionalidad del tráfico motorizado, empeorando el nivel de servicio de la vía. Por tanto, a la hora de realizar estudios en carreteras convencionales hay que tener en cuenta a todos los usuarios, integrando a los ciclistas en los estudios e incorporando su circulación tanto de manera individual como en grupo.

En esta investigación se proponen varias medidas de gestión de la infraestructura y del tráfico destinadas a aumentar la funcionalidad del tráfico, sin comprometer la seguridad de estos usuarios. Se tendrá en cuenta la circulación de grupos de ciclistas, considerando diferentes tamaños de grupo y configuración en línea o en paralelo, reflejando así la realidad observada en las carreteras. Se desarrolla una metodología que permite adaptar, calibrar y validar un modelo de microsimulación del tráfico que represente fielmente el fenómeno bajo análisis, y que permita simular y analizar las diferentes medidas de gestión propuestas. Como resultado se propondrán recomendaciones en cuanto a medidas de gestión que mejoren la convivencia de conductores y ciclistas.

1.2 Objetivos

El objetivo de la investigación es la evaluación de varias medidas de gestión propuestas para mejorar la seguridad de los usuarios y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales en las que conviven conductores y ciclistas.

Para ello se ha desarrollado un modelo de microsimulación del tráfico en Aimsun Next que incorpora a los ciclistas y a sus interacciones con los vehículos motorizados en carreteras convencionales basándose en observaciones naturalísticas del fenómeno.

El segundo objetivo de esta investigación es el desarrollo de una guía metodológica para implementar este análisis en tramos de carretera con diferentes características no contempladas específicamente en este estudio.

Se definen los siguientes objetivos específicos:

- Adaptar un modelo de microsimulación del tráfico en Aimsun Next para que represente la circulación mixta de vehículos a motor y ciclistas en carreteras convencionales. Calibrar y validar este modelo con datos observados en campo.
- Diseñar escenarios de tráfico que incorporen variaciones en el tráfico de vehículos motorizados y de ciclistas adaptados a las características de las carreteras convencionales analizadas.
- Proponer medidas de gestión de la infraestructura y del tráfico enfocadas a mejorar tanto la seguridad como la funcionalidad del tráfico en estas condiciones.

- Simular mediante los modelos de microsimulación del tráfico los escenarios relativos a cada una de las medidas de gestión propuestas, considerando las variaciones en los niveles de tráfico.
- Analizar los resultados obtenidos mediante las simulaciones de las diferentes medidas de gestión teniendo en cuenta las variaciones de tráfico propuestas.
- Proponer recomendaciones basadas en criterios técnicos resultados de la investigación que ayuden a mejorar la situación actual, teniendo en cuenta a todos los usuarios de las carreteras convencionales.
- Elaboración de una guía metodológica de implementación en otros tramos de carretera con diferentes características.

2 Metodología

El estudio se ha realizado particularmente en un tramo de carretera convencional sin arcén en el que es habitual la circulación de ciclistas. En este tramo de carretera se han llevado a cabo dos metodologías de toma de datos que han permitido caracterizar las interacciones entre bicicletas y vehículos ligeros en este entorno, así como registrar datos del tráfico a nivel macroscópico.

A partir de las observaciones realizadas en campo, se ha adaptado el software de microsimulación de tráfico Aimsun Next, que cuenta con un módulo específico para simular carreteras convencionales, incorporando a los ciclistas y sus interacciones con los vehículos motorizados. De esta manera, se ha conseguido un modelo de microsimulación del tráfico que permite simular carreteras convencionales con tráfico mixto compuesto por vehículos motorizados y bicicletas. El modelo de microsimulación del tráfico ha sido específicamente calibrado y validado para el tramo de carretera en el que se ha desarrollado el estudio a partir de todas las observaciones de campo.

Este modelo de microsimulación de tráfico ha sido utilizado para simular varias medidas de gestión de la infraestructura y del tráfico, analizando sus efectos sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico en diversas condiciones de tráfico tanto de vehículos motorizados como de bicicletas.

La investigación se ha desarrollado en un tramo piloto de carretera convencional, aplicando las metodologías de tomas de datos, y desarrollando el modelo de microsimulación del tráfico en base a las observaciones. Sin embargo, la finalidad de esta investigación es definir una metodología que permita gestionar cualquier carretera convencional, abarcando un elevado rango de características geométricas y de tráfico. Para ello, en vista de los resultados obtenidos en la carretera piloto, se desarrollará una guía metodológica que permita implementar esta investigación en otras carreteras.

2.1 Tramo de carretera en el que se ha desarrollado el estudio

El estudio se ha realizado en un tramo de carretera convencional con elevada presencia ciclista perteneciente a la carretera CV-502. Este tramo ha servido de tramo piloto en el que se han llevado a cabo las tomas de datos naturalísticas y la metodología de desarrollo del modelo de microsimulación.

El tramo de la CV-502 representa una carretera convencional estrecha sin arcén, en la que los ciclistas circulan por el carril compartiéndolo con los vehículos a motor. Dispone de un ancho de carril de 3.5 m, y la velocidad límite es de 70 km/h. Tiene una elevada demanda ciclista, y la mayoría de grupos circulan en paralelo.

En la Figura 1 se muestra la sección transversal del tramo de carretera en el que se ha llevado a cabo este trabajo de investigación. Este tramo de carretera circula paralelo a la playa, en él la pendiente es nula o reducida, y la circulación de ciclistas es habitual, tanto en días laborables como festivos. El tráfico motorizado en este tramo presenta una IMD de 3948 veh/día, y un factor estacional en agosto de 0.5, indicando que en verano la IMD de vehículos motorizados se ve duplicada (Diputació de València., 2021).



Figura 1. Sección transversal del tramo de la CV-502.

2.2 Observación del fenómeno

Como dato de partida es esencial conocer el fenómeno analizado. Para ello se han desarrollado dos metodologías de tomas de datos mediante las cuales se han recopilado datos a nivel microscópico, relativos a la maniobra de adelantamiento entre conductores y ciclistas, y a nivel macroscópico o de sección.

La primera metodología consiste en el uso de bicicletas instrumentadas con videocámaras y dispositivos láser que permiten recoger datos de maniobras de adelantamiento, como la separación lateral, la velocidad del vehículo adelantante y la duración de la maniobra. Estos datos se registran en todo el tramo de carretera analizado realizando recorridos de ida y vuelta con las bicicletas instrumentadas. Los ciclistas participantes en estas tomas de datos circulan individualmente y en grupos de dos, cuatro y diez ciclistas circulando tanto en línea como en paralelo. De esta manera se registran maniobras de adelantamiento desde las bicicletas instrumentadas considerando diferentes tamaños y configuraciones del grupo de ciclistas.

En la segunda metodología de toma de datos se realizan grabaciones estáticas y simultáneas en los extremos de los tramos de carretera durante un periodo de tiempo suficiente para poder caracterizar el tráfico. Se registran los tiempos de paso de cada usuario por la entrada y salida del tramo, y después de reducir y procesar los datos se obtienen varios escenarios de tráfico observados correspondientes con intensidades horarias equivalentes y velocidades medias de recorrido de cada tipología de usuario.

También se recopilan otras variables como intervalos de tiempo entre usuarios y porcentajes de usuarios en cola en los extremos de los tramos de carretera.



Figura 2. Tomas de datos naturalísticas. Izda: bicicletas instrumentadas. Dcha: Grabaciones estáticas.

Todas estas observaciones y tomas de datos naturalísticas son la base para entender el fenómeno analizado, y a partir de ellas se adaptará el modelo de microsimulación del tráfico, de manera que represente fielmente la realidad.

2.3 Microsimulación del tráfico

En esta investigación se ha utilizado el microsimulador del tráfico Aimsun Next (Aimsun, 2022), el cual cuenta con un módulo específico para carreteras convencionales que fue desarrollado, calibrado y validado en base a observaciones, pero solamente teniendo en cuenta a vehículos motorizados (Llorca et al., 2015).

Para realizar este estudio es necesario adaptar el microsimulador para que simule correctamente a ciclistas, conductores y sus interacciones en carreteras convencionales. Para ello se realizó un exhaustivo análisis de todos los parámetros del modelo, así como de las principales limitaciones observadas a la hora de simular el fenómeno. La adaptación del modelo de microsimulación se basará en el comportamiento observado de conductores y ciclistas.

El modelo de microsimulación del tráfico en Aimsun Next para carreteras convencionales presentaba algunas limitaciones que fueron superadas con la finalidad de integrar a los ciclistas y a sus interacciones con los vehículos motorizados, permitiendo así el análisis de situaciones en las que estos dos tipos de usuarios comparten estas vías.

Las principales limitaciones que presentaba Aimsun Next en cuanto a la circulación de ciclistas y a su interacción con los vehículos a motor, y las modificaciones realizadas para superarlas se enumeran a continuación:

- Posibilidad de adelantar a ciclistas incluso en línea continua. En la versión inicial de Aimsun Next no era posible adelantar a ciclistas en línea continua, tal y como permite la normativa en España. Esta limitación se superó al incluir un parámetro en la nueva versión Aimsun Next 20 que permite adelantar a vehículos lentos incluso en línea continua. Este parámetro se introduce

como un umbral de diferencia de velocidad deseada entre un usuario y el que le precede a partir de la cual se permite el adelantamiento incluso en línea continua.

- Incorporación de grupos de ciclistas en el microsimulador. A partir de las observaciones realizadas en los tramos de carretera se comprobó que los ciclistas no se reagrupaban durante el recorrido de los tramos de carretera, conservando en la mayoría de los casos las configuraciones de grupo durante todo el recorrido. Este comportamiento fue verificado para tramos sin pendiente correspondientes al alcance de este estudio. Por tanto, se consideró introducir a los grupos de ciclistas en el microsimulador como un solo usuario, permitiendo el adelantamiento de todo el grupo tal y como se observó en campo.
- Adelantamientos a ciclistas con invasión parcial del carril opuesto. Este comportamiento fue observado en la realidad, sobre todo en tramos de carretera con secciones más favorables. En Aimsun Next 20 no son compatibles el modelo bidireccional con el bidimensional, por tanto, en las simulaciones en carreteras convencionales donde se permite la interacción con el tráfico opuesto es necesario cambiar totalmente de carril para realizar el adelantamiento. Para superar esta limitación y obtener datos de duraciones del adelantamiento a cada grupo de ciclistas similares a las observadas en cada tramo de carretera, se calibró la longitud equivalente de cada grupo de ciclistas. De esta manera se incorporó el efecto de la invasión parcial del carril opuesto durante las maniobras de adelantamiento a ciclistas dentro del modelo de microsimulación.
- Adelantamientos con duraciones menores de 4 s. Otra limitación que se observó a la hora de incorporar a ciclistas en el microsimulador fue la imposibilidad de obtener duraciones del adelantamiento menores a 4 s. Para superar esta limitación se contó con la ayuda del equipo de Aimsun Next, quienes proporcionaron una nueva versión del modelo en la que se incorporó una mejora consistente en la posibilidad de realizar adelantamientos con sólo dos pasos de simulación a los usuarios que presentasen un ancho menor a la mitad del carril. Esta mejora permitió realizar adelantamientos con menores duraciones teniendo en cuenta el ancho de los usuarios. Por tanto, a los ciclistas se les proporcionó un ancho que cumpliera la especificación considerada en esta mejora.

Por otra parte, una vez adaptado el modelo es necesario calibrarlo y validarlo para cada uno de los tramos de carretera analizados en base a las observaciones realizadas en campo. De esta manera es posible disponer de un modelo de microsimulación del tráfico específico para cada tramo de carretera, que permita simular otras situaciones tanto de tráfico como geométricas y/o normativas.

Mediante el modelo de microsimulación del tráfico debidamente calibrado y validado para cada tramo de carretera específicamente, se simularán los escenarios diseñados que incorporan las diferentes medidas de gestión planteadas. Se realizarán 15 replicaciones de cada escenario, y se trabajará con los valores medios de estas 15 replicaciones para que los resultados no dependan de la aleatoriedad de las replicaciones.

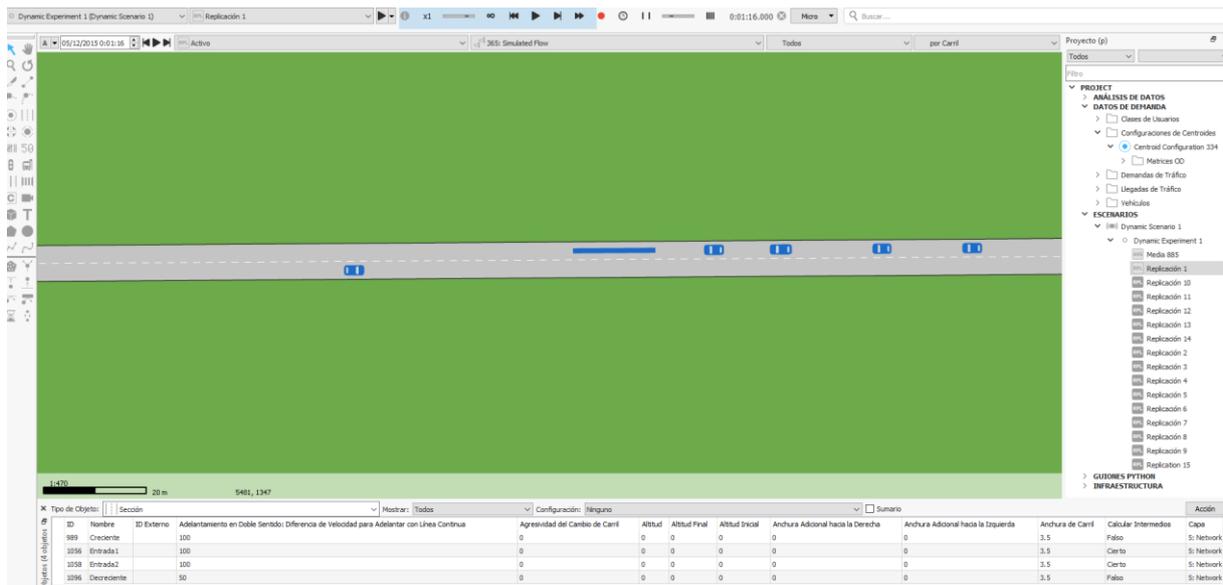


Figura 3. Ejecución de una simulación en el software Aimsun Next.

Se utilizarán los resultados aportados directamente desde el software Aimsun Next, y los datos recogidos mediante diversas APIs específicas que obtienen datos de cada usuario. Estos datos se almacenan en Excel, donde mediante programación se tratan y elaboran los gráficos comparativos.

2.4 Diseño de escenarios de tráfico

Los modelos de microsimulación del tráfico, debidamente calibrados y validados, permiten obtener un mayor número de medidas de desempeño y más rápidamente que mediante observaciones de campo. Por otra parte, la microsimulación también permite ampliar el rango de escenarios de tráfico observados en campo, llevando el modelo a niveles de tráfico más elevados que los observados, determinando la respuesta del modelo ante estas variaciones de tráfico.

En este estudio se diseña una batería de escenarios de tráfico que incorpore variaciones tanto en el tráfico motorizado como en el ciclista. El estudio se realiza específicamente considerando el nivel de tráfico del tramo de carretera observado, ajustando el diseño de escenarios de tráfico a las características particulares de cada carretera.

Se plantean 2 escenarios de tráfico motorizado (M) diferentes para cubrir diversas situaciones de demanda:

- M1 - corresponde con la intensidad horaria de motorizados observada en el tramo de estudio en el periodo de máxima demanda ciclista registrada.
- M2 - corresponde con el valor de la IMD considerando los factores estacionales o diarios de cada tramo obtenidos mediante bases de datos oficiales. M2 representa la máxima variación en el nivel de tráfico obtenida a partir de los datos de aforos oficiales.

La demanda de bicicletas es más compleja que la de vehículos motorizados, ya que, no solamente se debe de considerar el número de bicicletas, sino también su agrupación y la configuración en la que

circulan los grupos. En este estudio se diseñan escenarios específicos que consideran estos factores para analizar su influencia sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico:

- En cuanto a la demanda ciclista, se plantean 4 escenarios de intensidades horarias de ciclistas (B) diferentes para cubrir un rango suficiente que permitirá analizar la evolución de las diferentes medidas de desempeño a medida que aumenta el tráfico ciclista. Los escenarios que se plantean son los siguientes:
 - B0 - demanda nula de ciclistas.
 - B1 - 50% de la máxima demanda ciclista observada en carretera.
 - B2 - 100% de la máxima demanda ciclista observada en cada carretera.
 - B3 - 200% de la máxima demanda ciclista observada en cada carretera.
- Configuración del grupo de ciclistas (línea (L) o paralelo (P)). Se comparan los escenarios de demanda ciclista expuestos anteriormente considerando que todos los grupos circulan únicamente en paralelo o en línea.

2.5 Medidas de gestión

La finalidad de este estudio es proponer medidas de gestión que permitan integrar a los ciclistas en las carreteras convencionales de manera más segura y eficiente. Para ello se proponen y evalúan varias medidas desde el punto de vista de la seguridad, pero también analizando su afección sobre la funcionalidad del tráfico.

Algunas de las medidas de gestión propuestas están relacionadas con la propia infraestructura, como la variación en la velocidad límite del tramo o la restricción del adelantamiento a ciclistas en algunas curvas. Otras medidas de gestión están enfocadas sobre el tráfico, como las recomendaciones de tamaño y configuración de los grupos de ciclistas. Finalmente, también se proponen medidas de gestión normativas, como la reducción de la velocidad durante el adelantamiento a ciclistas.

2.5.1 MG1: Gestión de la velocidad límite de la carretera

Una de las principales medidas a contrastar en este estudio, por su repercusión tanto en la seguridad como en la funcionalidad del tráfico, es la gestión de la velocidad límite (VL) de la carretera. Se analizará cómo afectan variaciones de la VL analizando diversos escalones de velocidad y llegando a un mínimo de 50 km/h (máximo en travesía):

- VL1: velocidad límite actual del tramo de carretera.
- VL2: velocidad límite reducida en 10 km/h respecto de la VL1.
- VL3: velocidad límite reducida en 20 km/h respecto de la VL1.

2.5.2 MG2: Gestión de la velocidad durante el adelantamiento

Se trata de una medida de carácter normativo que pretende evaluar la afección tanto en la seguridad, como en la funcionalidad del tráfico, que derivaría de reducir la velocidad máxima de los vehículos motorizados durante la maniobra de adelantamiento a los grupos de ciclistas. Para ello se simularán dos escenarios diferentes:

- VA1: velocidad durante el adelantamiento igual a la velocidad límite del tramo de carretera.
- VA2: velocidad durante el adelantamiento reducida en 20 km/h respecto de la velocidad límite del tramo de carretera.

2.5.3 MG3: Gestión del tráfico: tamaño y configuración del grupo de ciclistas

Otra variable que se puede regular como medida de gestión del tráfico es el tamaño máximo del grupo de ciclistas, y la configuración óptima del grupo, que debe circular por un tramo de carretera dadas unas condiciones geométricas y de tráfico.

El Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003) permite la circulación de grupos de ciclistas en columna de a dos, debiendo de colocarse en hilera en tramos sin visibilidad y cuando formen aglomeraciones de tráfico. Sin embargo, esta medida carece de base científica.

En este apartado se estima simular tres demandas ciclistas diferentes, que se combinarán con 4 tamaños de grupo diferentes, con las posibles configuraciones de línea o paralelo:

- Db1: 60 ciclistas/hora.
- Db2: 200 ciclistas/hora.
- Db3: 600 ciclistas/hora.
- 4GR: Individuales, grupos de 2 ciclistas, grupos de 4 ciclistas y grupos de 10 ciclistas.
- 2CONF: ciclistas en línea y ciclistas en paralelo.

De esta manera se analizará el efecto de las tres intensidades de ciclistas y su agrupamiento en diversos tamaños de grupo y en diferente configuración.

2.6 Caracterización de la seguridad y la funcionalidad del tráfico

La caracterización de la seguridad y funcionalidad del tráfico se llevará a cabo mediante el cálculo de indicadores específicos que permitan evaluar la influencia de cada una de las cuatro medidas de gestión definidas.

La seguridad se caracteriza mediante el indicador del porcentaje de exposición al riesgo de colisión frontal con los vehículos que circulan en sentido opuesto. Para ello se calcula el tiempo de exposición al riesgo promedio por vehículo (*TER*) como la duración promedio de los adelantamientos por el número promedio de adelantamientos que realiza cada vehículo.

$$TER (s) = \text{Duración promedio adelantamiento (s)} * N^{\circ} \text{ adelantamientos/veh} \quad (1)$$

Este valor del *TER* representa el tiempo promedio que un vehículo circula por el carril contrario, implicando un riesgo de colisión frontal con los vehículos que circulan en sentido opuesto. No obstante, esta medida subrogada de seguridad vial representa un valor absoluto de tiempo unitario promedio por vehículo, no siendo suficiente para poder comparar la exposición al riesgo considerando diferentes escenarios de tráfico y geométricos.

Para hacer posible estas comparaciones, se define el porcentaje de exposición al riesgo ($\%ER$) como el porcentaje de tiempo que un vehículo circula por el carril opuesto debido al adelantamiento a ciclistas respecto del tiempo total de recorrido del tramo de carretera (TR). Este porcentaje de exposición al riesgo se define en la ecuación 2.

$$\%ER = \left(\frac{TER}{TR} \right) * 100 \quad (2)$$

Por otra parte, la caracterización de la funcionalidad del tráfico en este estudio se va a realizar en base a medidas de desempeño calculadas a partir de las simulaciones. Estas medidas de desempeño son:

- Velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros (ATS).
- Número de adelantamientos realizados en el tramo por vehículo (Adel/veh).
- Porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo ($\%D/TT$).

En una investigación previa se confirmó que estas medidas de desempeño son las más sensibles a la circulación mixta de ciclistas y conductores en carreteras convencionales, representando correctamente la afección de variaciones en el nivel de tráfico sobre la funcionalidad del tráfico en estas condiciones (Moll, 2021).

Mediante estas medidas de desempeño y los indicadores de seguridad vial definidos anteriormente será posible identificar el efecto real de estas medidas sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico. Estos resultados se traducirán en recomendaciones de gestión de la velocidad y de circulación de los grupos de ciclistas según el tramo de carretera considerado y el nivel de tráfico presente en la vía.

3 Resultados

Los principales resultados de este trabajo de investigación se exponen en este apartado. El primer resultado se refiere al desarrollo del modelo de microsimulación del tráfico, de manera que represente la circulación mixta de ciclistas y conductores en carretera convencional, con especial interés en sus interacciones. Los modelos utilizados han requerido algunas modificaciones y adaptaciones a partir de un modelo inicial donde solamente se consideraban vehículos a motor en carretera convencional. Se presentan los datos naturalísticos registrados en la carretera piloto mediante las bicicletas instrumentadas y las observaciones desde cámaras estáticas. Estos datos han servido para calibrar y validar los modelos de microsimulación del tráfico específicos para este tramo de carretera.

Seguidamente se presentan los resultados de las simulaciones de los escenarios que combinan las diferentes medidas propuestas con los diferentes niveles de tráfico tanto motorizado como ciclista. El estudio se ha realizado específicamente para el tramo de carretera de la CV-502.

A partir de los resultados observados se desarrolla una guía metodológica para implementar esta investigación a otros tramos de carretera convencional con diferentes características de tráfico y geométricas, con el fin de ampliar el estudio a cualquier carretera convencional considerando sus características geométricas y de tráfico.

3.1 Modelo de microsimulación del tráfico

En primer lugar, se ha modelizado el escenario físico correspondiente al tramo de la CV-502, que representa una carretera estrecha sin arcén. Este tramo ha sido modelizado a partir de los datos reales observados en campo, incorporando sus características de velocidades límite, longitud y líneas centrales continuas y discontinuas.

Por otra parte, se han recogido datos en campo relativos al tráfico y a las maniobras de adelantamiento entre vehículos motorizados y ciclistas. Estas observaciones han permitido calibrar y validar los modelos específicamente para el tramo de carretera analizado.

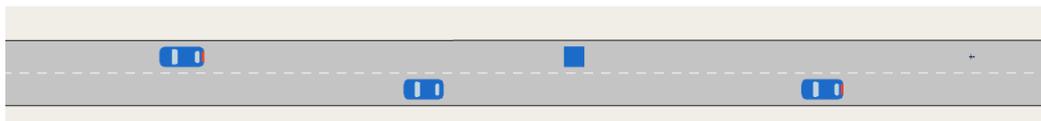


Figura 4. Simulación del tráfico en Aimsun Next.

3.1.1 Observaciones en campo: datos para calibración y validación del modelo

A partir de los registros de las bicicletas instrumentadas se han caracterizado correctamente un total de 225 maniobras de adelantamiento en este tramo de carretera.

Los ciclistas han circulado por el tramo durante varias jornadas de tomas de datos, realizando recorridos sucesivos del mismo. Estos recorridos los han realizado en siete configuraciones distintas del grupo, variando el número de ciclistas y su configuración en línea y en paralelo, de esta manera se registraron datos de maniobras de adelantamiento a ciclistas circulando individualmente y en grupos de 2, 4 y 10 ciclistas circulando en línea y en paralelo.

Las tomas de datos con las bicicletas instrumentadas se organizaron en base a observaciones naturalísticas previas, donde se identificaron los patrones de circulación de ciclistas en cuanto a horarios e intensidades. Las tomas de datos se realizaron en 5 jornadas, siendo en días laborables para los grupos de 1, 2 y 4 ciclistas, mientras que para los grupos de 10 ciclistas las tomas de datos se realizaron en fin de semana, ya que es cuando los conductores esperan encontrarse a grupos más grandes de ciclistas.

Los datos de las maniobras de adelantamiento se registraron mediante las cámaras frontal y trasera de cada bicicleta, donde se observaron los tiempos de inicio y fin de la maniobra y las diferentes características del entorno en el que se realizó el adelantamiento, como el tipo de línea central, o la alineación horizontal. También se obtuvieron datos a partir de los registros del dispositivo láser colocado en las bicicletas, que registró datos de velocidad relativa y separación lateral durante el adelantamiento.

Después de un laborioso proceso de reducción de datos, se han caracterizado las maniobras de adelantamiento, obteniendo como principales variables de esta maniobra las separaciones laterales, las velocidades durante el adelantamiento y las duraciones de las maniobras. Los resultados, para cada configuración del grupo de ciclistas en este tramo de carretera, se muestran en la Tabla 1.

Configuración	Observaciones		Velocidad (km/h)		Separación (m)		Duración (s)	
	N	%	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
Individual (1)	37	16%	65.60	15.66	1.88	0.455	5.65	1.65
2 en línea (2L)	41	18%	66.39	19.35	1.78	0.461	6.71	2.11
2 en paralelo (2P)	42	19%	62.48	13.94	1.60	0.458	6.17	1.99
4 en línea (4L)	36	16%	68.46	13.55	1.91	0.42	8.58	2.22
4 en paralelo (4P)	31	14%	63.03	14.84	1.67	0.32	6.84	2.00
10 en línea (10L)	16	7%	62.06	9.72	1.99	0.39	9.44	2.22
10 en paralelo (10P)	22	10%	64.68	12.75	1.83	0.51	7.59	1.97
Total	225	100%	64.85	14.91	1.79	0.45	7.03	2.30

Tabla 1. Número de adelantamientos registrados y datos de velocidad del vehículo adelantante, separación lateral y duración del adelantamiento según configuración del grupo de ciclistas adelantado en la CV-502.

Se observa que los valores de las velocidades del vehículo adelantante durante el adelantamiento fueron similares para todas las configuraciones de ciclistas estudiadas. Se realizó una prueba ANOVA de comparación de las medias de las velocidades según el grupo de ciclistas adelantado, resultando en la no existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las velocidades del adelantante con un nivel de confianza del 95%.

En cuanto a las separaciones laterales durante el adelantamiento, sí se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las medias para cada configuración de ciclistas adelantada con un nivel de significancia del 5%, de manera que cuando los ciclistas circularon en línea se registraron separaciones mayores que cuando lo hicieron en paralelo. Sin embargo, en todos los casos, las separaciones laterales medias respetaron la distancia mínima de 1.5 metros exigida por normativa (Ministerio del Interior, 2003).

Las duraciones de los adelantamientos también presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias para los diferentes grupos de ciclistas adelantados. Estas duraciones fueron mayores a medida que aumentaba el número de ciclistas que formaban el grupo, mientras que para el mismo número de ciclistas la duración media de los adelantamientos fue mayor cuando los ciclistas circulaban en línea que cuando circulaban en paralelo.

Por otra parte, se llevó a cabo una segunda metodología de toma de datos para obtener datos de tráfico a nivel macroscópico o de sección. Para ello se realizaron grabaciones de vídeo simultáneas en los dos extremos del segmento de carretera, y a partir de un proceso laborioso de reducción de datos se identificaron los tiempos de entrada y salida del tramo de cada usuario. Otra variable obtenida fue la velocidad media de recorrido del tramo de cada usuario. También se obtuvieron los patrones de circulación de ciclistas, según tamaños de grupo y configuraciones.

La toma de datos se realizó un sábado de abril por la mañana, iniciando a las 8h y con una duración de unas 5h. Las bicicletas acumuladas registradas en cada sentido de circulación durante el periodo de toma de datos fueron de 166 en sentido decreciente y 93 en sentido creciente. El número de

vehículos motorizados ligeros registrados durante el periodo de observación fue de 263 en sentido decreciente y 319 en sentido creciente.

A partir de estas observaciones se decidió realizar el estudio en el sentido decreciente del tramo, ya que fue el sentido con mayor número de ciclistas observados. A partir de las observaciones acumuladas cada 15 minutos, y utilizando el método de la ventana deslizante de 5 minutos, se obtuvieron los escenarios de tráfico horario equivalente.

En la Figura 5 se muestran las intensidades horarias resultantes para las bicicletas, los vehículos ligeros y los vehículos ligeros opuestos. Estas intensidades horarias equivalentes representan el conjunto de escenarios de tráfico obtenidos a partir de las observaciones realizadas en el tramo de carretera. Estos escenarios de tráfico se utilizarán para calibrar y validar el modelo de microsimulación del tráfico en Aimsun Next.

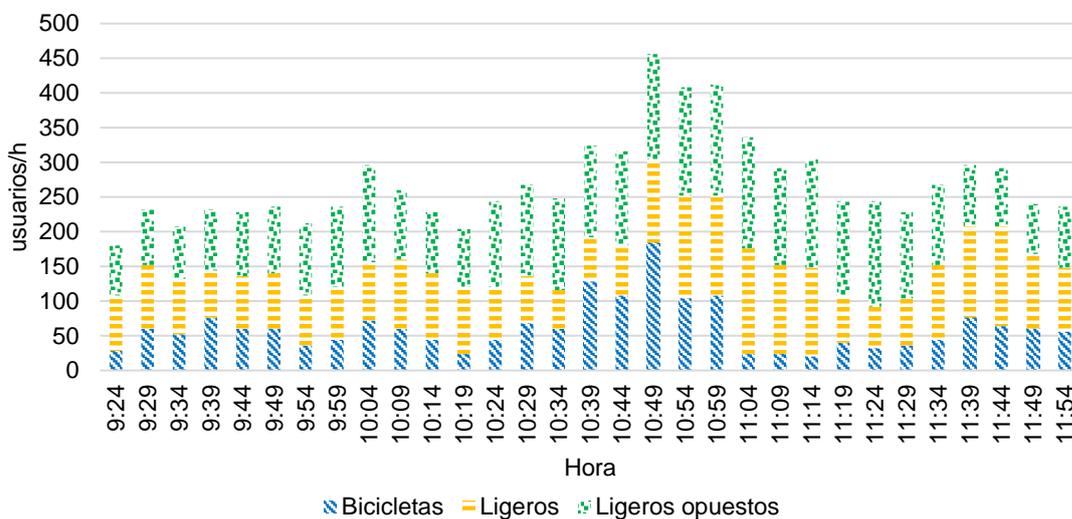


Figura 5. Intensidades horarias equivalentes de usuarios calculadas para la CV-502.

3.1.2 Calibración y validación

Los escenarios de tráfico utilizados en la calibración y la validación se seleccionaron de entre los mostrados en la Figura 5. Para calibrar el modelo se utilizaron los escenarios de demanda máxima y mínima de bicicletas, y un tercer escenario de demanda media, con sus correspondientes demandas de ligeros en el mismo sentido de circulación y en sentido opuesto (Calmin, Calmed y Calmax en la Tabla 2).

Una vez calibrado el modelo se validó considerando cuatro escenarios de demanda diferentes a los utilizados en la calibración (Val1, Val2, Val3 y Val4 en la Tabla 2). Para calibrar y validar el modelo se consideraron los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo por separado.

Intensidades (usuarios/h)	Calmin	Calmed	Calmax	Val1	Val2	Val3	Val4
Ligeros	128	144	120	76	64	136	108
Ligeros opuestos	156	160	152	136	156	88	84
1	12	36	40	24	16	24	20
2P/2L	4	12	8	16	0	16	0
4P/4L	0	0	4	0	4	4	8
10P/10L	0	4	12	8	0	0	0
Total bicicletas/hora	20	100	192	136	32	72	52

Tabla 2. Escenarios de tráfico (usuarios/h) utilizados para la calibración y la validación del tramo de la CV-502.

Durante el proceso de calibración los parámetros calibrados en el modelo han sido:

- Parámetros específicos de las velocidades deseadas de cada tipología de usuarios presentes en las simulaciones, es decir, de los vehículos motorizados y de los siete grupos de ciclistas incluidos en el estudio.
- La longitud de los tramos de generación de cola situados a la entrada de cada sentido de circulación, de tal manera que los porcentajes de usuarios en cola en la entrada del tramo, en los dos sentidos de circulación, no presentase diferencias estadísticamente significativas con las observaciones.
- Longitudes equivalentes de los grupos de ciclistas para conseguir que las duraciones de los adelantamientos obtenidas en las simulaciones no presentasen diferencias estadísticamente significativas respecto de las obtenidas en las observaciones de campo.

El resto de los parámetros del modelo se revisó con detalle, y se intentó variar mínimamente los valores originales para no afectar a la interacción entre motorizados, ya que en el modelo resultante los vehículos motorizados también deben de interactuar entre sí de manera correcta.

El modelo se calibró a nivel microscópico comparando las duraciones de las maniobras de adelantamiento a diferentes grupos de ciclistas, y a nivel macroscópico comparando las distribuciones de velocidades medias de recorrido de los vehículos motorizados.

Otra variable utilizada para la calibración a nivel macroscópico del modelo de microsimulación fue el intervalo de tiempo entre usuarios en la entrada y salida del tramo. El porcentaje de vehículos en cola también se utilizó para la calibración del modelo, y se calculó en los extremos del tramo para los tres escenarios de calibración a partir de los datos observados y de las simulaciones. A efectos de cálculo se consideró que un usuario circulaba en cola cuando el intervalo de tiempo con el precedente era menor de 3 segundos, según se recomienda en el HCM 2016 (Transportation Research Board, 2022). Para el cálculo de los usuarios en cola se consideraron todos los usuarios de la vía, tanto ciclistas como conductores.

Se compararon mediante tests estadísticos los datos observados en campo con los resultados de las simulaciones para todas las variables descritas, obteniendo valores aceptables, considerando el

modelo debidamente calibrado. Este proceso se realizó para los tres escenarios de tráfico definidos para la calibración y descritos en la Tabla 2.

Se realizaron varios procesos de calibración del modelo, variando en cada uno de ellos los parámetros necesarios. Finalmente se obtuvieron los valores de los parámetros que minimizaban las diferencias entre los valores observados y resultados de las simulaciones de las variables. En la Tabla 3 se muestran los resultados de los principales parámetros después del proceso de calibración.

Segmento	Diferencia de velocidades para adelantar en línea continua (km/h) = 20 km/h			
	Longitud tramos generación de colas (m) = 350 m			
Usuarios	Longitudes equivalentes (m): Individual = 4 m; 2P = 6 m; 4P = 10 m; 10P = 16 m			
	2L = 11 m; 4L = 28 m; 10L = 35 m			
	Velocidad máxima deseada Ligeros = media 78 km/h (Desv. 10 km/h)			
	Velocidad máxima deseada bicicletas = media 30 km/h (Desv. 2 km/h)			
Experimento	Demora entre adelantamientos simultáneos (s) = 0 s			
	Número de adelantamientos simultáneos permitidos = 5			
	Rango máximo en la cola para desear adelantar = 2			
	Umbral de tiempo hasta fin de tramo (s) = 5 s			

Tabla 3. Valores de los principales parámetros del modelo de microsimulación de tráfico calibrados para la CV-502.

El modelo se validó a partir de cuatro escenarios de tráfico diferentes a los utilizados en la calibración, y mostrados en la Tabla 2. El proceso de validación se realizó a nivel macroscópico, comparando los resultados de las simulaciones con las observaciones en campo de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros, el intervalo de tiempo entre vehículos y los porcentajes de vehículos en cola a la entrada y salida del tramo. En todos los casos se obtuvieron valores aceptables, considerando así el modelo calibrado y validado para este tramo de carretera específicamente.

Los procesos de calibración y validación del modelo de microsimulación del tráfico para este tramo específico de la CV-502 pueden consultarse con mayor detalle en (Moll, López, & García, 2021).

3.1.3 Diseño de escenarios de tráfico

Para el diseño de escenarios se parte del escenario de demanda máxima de ciclistas observado en este tramo de estudio y denominado Calmax en la Tabla 2.

La demanda de vehículos motorizados ligeros correspondiente al escenario Calmax definido anteriormente, se corresponde con el escenario M1 de vehículos motorizados observados. Por otra parte, se consultó el Libro de Aforos de la Diputació de València (Diputació de València., 2021), donde se observó un aumento significativo del volumen de tráfico de vehículos motorizados en el tramo de la CV-502 durante el verano, siendo el factor del mes de agosto (L_8) de 0.5.

El tramo de estudio de la CV-502 es un tramo cercano a la playa, donde en verano el nivel de tráfico aumenta considerablemente, así el escenario de tráfico de motorizados M2 corresponde a la situación de verano, y se calcula aplicando el factor de verano observado en el Libro de Aforos a la intensidad horaria, calculada a partir de la IMD, correspondiente a un 10% de esta.

$$M2_{sentido} = I_h * L_8 = 0.1 * IMD_{sentido} * L_8 = 0.1 * \frac{3948}{2} * 0.5 = 395 \text{ veh/h} \quad (3)$$

La intensidad horaria correspondiente a M2 en el sentido opuesto se ha calculado proporcional a la observada. La Tabla 4 muestra los valores de los dos escenarios de tráfico motorizado considerados para la CV-502.

	M1	M2
Sentido de estudio	120 veh/h	395 veh/h
Sentido opuesto	152 veh/h	500 veh/h

Tabla 4. Diseño de escenarios de tráfico de vehículos motorizados (usuarios/h) para la CV-502.

Para el diseño de escenarios de demanda ciclista se consideró como base el escenario observado con mayor demanda ciclista (Calmax), y a partir de este se diseñaron el resto de los escenarios. En este estudio la agrupación de los ciclistas se ha mantenido proporcional al escenario base, que corresponde con la máxima demanda ciclista observada. En algunos casos ha sido necesario redondear el número de grupos para obtener valores enteros.

Finalmente los escenarios de demanda ciclista se pueden observar en la Tabla 5. El número total de ciclistas en estos escenarios varió entre ningún ciclista y 384 ciclistas/hora, cubriendo así un rango suficiente de demanda ciclista que permitirá analizar la evolución de las diferentes medidas de desempeño a medida que aumenta el tráfico ciclista. Estos escenarios de tráfico ciclista se han utilizado para simular las medidas de gestión MG1 y MG2, y así analizar como varían los parámetros al aumentar la demanda ciclista en el tramo de carretera.

	B0	B1	B2	B3
% Máximo observado ciclistas	0%	50%	100%	200%
1 ciclista	0	20	40	80
2 ciclistas	0	4	8	16
4 ciclistas	0	2	4	8
10 ciclistas	0	6	12	24
Total bicicletas/hora	0	96	192	384

Tabla 5. Diseño de escenarios de tráfico de grupos de ciclistas basado en el escenario de demanda máxima ciclista observada (usuarios/h) para la CV-502.

Otra variable importante a tener en cuenta es la configuración en línea o paralelo en la que circulan los grupos. En este estudio se simularon todos los escenarios de la Tabla 5 considerando que los grupos circulan en paralelo y seguidamente se volvió a simular considerando todos los grupos en línea. De esta manera fue posible determinar la influencia de la configuración en línea o en paralelo de los grupos de ciclistas sobre la funcionalidad del tráfico.

3.2 Medidas de gestión

Se presentan los resultados de cada medida de gestión en el tramo de carretera, obtenidos a partir de simular los escenarios planteados anteriormente en Aimsun Next.

Los resultados de las simulaciones han sido tratados para conseguir las medidas de desempeño descritas en el apartado 2.6, que servirán para caracterizar la seguridad y la funcionalidad del tráfico en las condiciones de tráfico simuladas en cada escenario.

La evolución de estas medidas de desempeño, según las variaciones en cada medida de gestión planteada, y considerando las variaciones en el tráfico motorizado y ciclista descritas anteriormente, se representa en gráficos. La interpretación de estos gráficos permite evaluar los efectos de cada medida de gestión planteada, dependiendo del nivel de tráfico presente en la vía, tanto motorizado como de bicicletas.

Para las tres medidas de gestión analizadas se han representado los gráficos en dos grupos, uno para cada nivel de tráfico motorizado presente en la carretera.

3.2.1 MG1: Gestión de la velocidad límite de la carretera

Se han planteado tres escenarios variando la velocidad límite de la carretera, el primero corresponde con la situación actual en el momento de la realización de este estudio, siendo de 70 km/h, el escenario 2 corresponde con una reducción de la velocidad límite del tramo en 10 km/h, resultando en un límite de velocidad de 60 km/h, y finalmente el escenario 3 presenta una reducción de 20 km/h, resultando en una velocidad límite del tramo de 50 km/h, correspondiendo con el límite de velocidad en travesía. Estos escenarios se han introducido en Aimsun Next modificando el parámetro de velocidad límite del tramo de carretera.

Al disminuir la velocidad límite del tramo de carretera las duraciones de los adelantamientos se ven afectadas, de manera que a menor velocidad límite de la vía la duración del adelantamiento será mayor. En cada uno de los tres escenarios considerando las diferentes velocidades límite de la vía se ha calculado las duraciones de los adelantamientos a los diferentes grupos de ciclistas según su tamaño y configuración.

En la Tabla 6 se muestran las duraciones medias del adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas introducidos en las simulaciones para los tres escenarios simulados. También se muestran las variaciones obtenidas entre el escenario con velocidad límite de 70 km/h, correspondiente con las observaciones, y los otros dos escenarios en los que se ha reducido la velocidad límite del tramo de carretera.

Se observa que una reducción de 10 km/h en la velocidad límite, pasando de 70 km/h a 60 km/h, ha aumentado las duraciones medias de los adelantamientos en un 17% considerando a todos los grupos de ciclistas; mientras que al reducir la velocidad límite del tramo en 20 km/h, pasando de 70 km/h a 50 km/h, la media de las duraciones de los adelantamientos se ha visto incrementada en un 47%.

Escenario de velocidad límite	Individual	2L	4L	10L	2P	4P	10P
Velocidad límite de 70 km/h	5.31 s	6.74 s	8.32 s	9.28 s	6.03 s	6.14 s	7.00 s
Velocidad límite de 60 km/h	6.09 s	7.85 s	9.69 s	10.81 s	7.21 s	7.33 s	7.88 s
Velocidad límite de 50 km/h	7.60 s	9.92 s	12.25 s	13.66 s	8.75 s	9.07 s	10.69 s
Variación (70-60 km/h)	15%	17%	16%	17%	19%	19%	13%
Variación (70-50 km/h)	43%	47%	46%	47%	45%	48%	53%

Tabla 6. Duraciones medias del adelantamiento (s) a los diferentes grupos de ciclistas considerando los dos escenarios, y variación entre los escenarios con diferentes reducciones de la velocidad límite.

Por tanto, al reducir la velocidad límite del tramo de carretera los adelantamientos a los ciclistas han incrementado su duración, con el consiguiente aumento del riesgo asociado a un mayor tiempo de exposición de los conductores al circular por el carril opuesto. El aumento de las duraciones de los adelantamientos a los ciclistas también tiene un efecto en cuanto a la funcionalidad del tráfico, penalizando la funcionalidad al requerir un mayor hueco en el sentido opuesto para poder realizar correctamente el adelantamiento, y reduciendo por tanto el número de adelantamientos realizados por vehículo tal y como se observa en la Figura 6.

En la Figura 6 se representan en los cuatro gráficos las medidas de desempeño resultantes de las simulaciones considerando un nivel de tráfico motorizado M1, correspondiente con el observado, y variando la intensidad de ciclistas y la velocidad límite del tramo de carretera. Las medidas de desempeño mostradas en cada gráfico son las descritas en el apartado 2.6: velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos motorizados (ATS) en km/h, porcentaje de adelantamientos realizado por cada vehículo motorizado (% Adel/veh), porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo total de recorrido del tramo de los vehículos motorizados(%D/TT) y porcentaje de exposición al riesgo de los vehículos motorizados (%ER).

En cada uno de los gráficos se representan seis líneas resultado de combinar los tres límites de velocidad con las configuraciones de los grupos de ciclistas en línea o en paralelo. Las líneas azules representan los resultados obtenidos considerando el límite de velocidad de la vía en 70 km/h, las líneas verdes corresponden con el límite de velocidad de 60 km/h, mientras que las líneas naranja corresponden con el límite de velocidad de la vía de 50 km/h. Cuando los grupos de ciclistas circulan en paralelo se ha representado con un cuadrado, mientras que cuando circulan en línea se ha representado con un círculo.

Respecto a la velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros (ATS en la Figura 6) se observa que a medida que aumenta la intensidad de ciclistas la ATS se reduce en los tres escenarios de velocidad límite simulados, sin embargo, esta reducción es más acusada cuando el límite de velocidad de la vía es superior. En los tres escenarios de velocidad límite simulados la configuración en paralelo de los grupos ha generado ATS ligeramente más elevadas.

Observando el gráfico superior derecho en la Figura 6, correspondiente al porcentaje de adelantamientos realizado por cada vehículo motorizado, el número de adelantamientos realizado por

cada vehículo aumenta a medida que la intensidad de ciclistas es mayor en la vía, siendo este aumento más acusado cuando la velocidad límite del tramo es superior. A partir del 100% de la demanda máxima de ciclistas observada, el % de adelantamientos por vehículo presenta un cambio de pendiente siendo la variación más suave. Respecto a la configuración de los grupos de ciclistas, cuando estos circulan en paralelo se registra un mayor porcentaje de adelantamientos pro vehículo en todos los escenarios de velocidad límite.

El porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo total de recorrido del tramo de los vehículos motorizados (Figura 6 inferior izquierda) aumenta a medida que aumenta la intensidad de ciclistas en el tramo para todos los escenarios de velocidad límite de la carretera, siendo este aumento más pronunciado cuando la velocidad límite del tramo es mayor.. En todos los casos, cuando los ciclistas circulan en paralelo el porcentaje de demora respecto del tiempo total de recorrido es menor que cuando circulan en línea.

Finalmente, el porcentaje de exposición al riesgo de los vehículos motorizados se representa en la Figura 6 inferior derecha. Se observa que el %ER aumenta al aumentar la intensidad horaria de ciclistas para todos los escenarios de velocidades límite simulados, siendo este aumento ligeramente mayor cuando la velocidad límite de la carretera es más elevada. En todos los casos, el %ER aumenta más acusadamente al introducir intensidades ciclistas menores al 100% de la demanda máxima observada, y para intensidades mayores la variación es menor. Respecto a la configuración de los grupos de ciclistas, cuando circulan en paralelo los valores de %ER fueron menores que cuando circularon en línea para los tres escenarios de velocidad límite simulados.

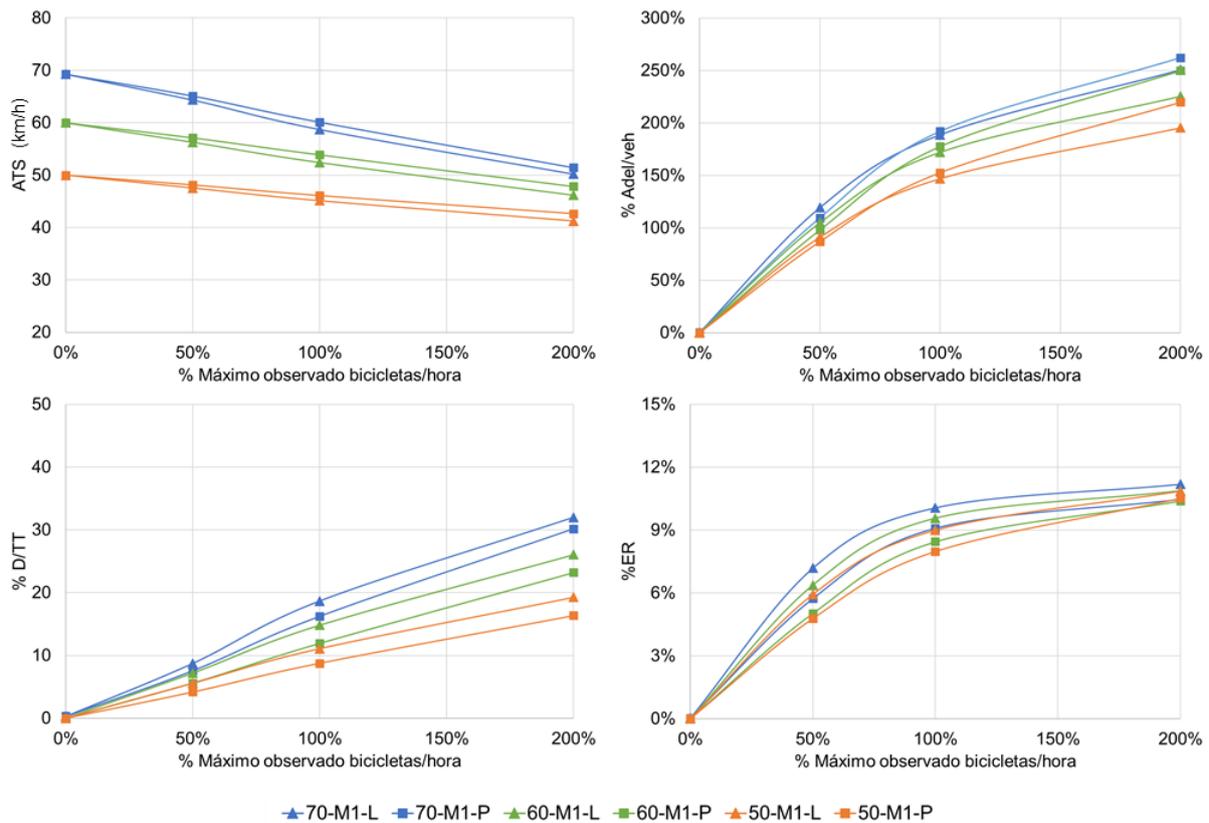


Figura 6. Medidas de desempeño (ATS, %Adel/veh, %D/TT y %ER) correspondientes al nivel de tráfico motorizado M1 considerando variaciones en la intensidad ciclista y en la velocidad límite del tramo de carretera.

La Figura 7 muestra las cuatro medidas de desempeño resultantes de las simulaciones considerando el nivel de tráfico motorizado M2, correspondiente a la situación más desfavorable de verano donde la IMD de la carretera se ve aumentada.

Cuando el tráfico de motorizados es más elevado, la velocidad media de recorrido de los ligeros (ATS) disminuye al aumentar la intensidad de ciclistas, pero lo hace más acusadamente que cuando la intensidad de motorizados era menor. Para intensidades elevadas de ciclistas la variación en la ATS es poco significativa.

En cuanto al porcentaje de adelantamientos realizados por cada vehículo motorizado, al ser la intensidad de motorizados más elevada se han registrado menos adelantamientos, ya que la oferta de huecos en el sentido opuesto es menor. A medida que aumenta la intensidad ciclista se han registrado más adelantamientos, y cuando los grupos circulan en paralelo también el número de adelantamientos ha sido mayor.

Al aumentar la intensidad de vehículos motorizados, el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo total de recorrido del tramo se ha visto incrementado debido al menor número de adelantamientos realizados. El aumento del %D/TT ha sido mayor para los escenarios correspondientes a la velocidad límite del tramo superior de 70 km/h.

Finalmente, el porcentaje de exposición al riesgo en la Figura 7 es menor que el mostrado en la Figura 6, donde la intensidad de vehículos a motor es menor. Esta reducción es debida al menor número de adelantamientos realizados. El %ER es mayor para los escenarios con velocidad límite más elevada, no mostrando en este caso diferencias entre las configuraciones en línea y en paralelo.

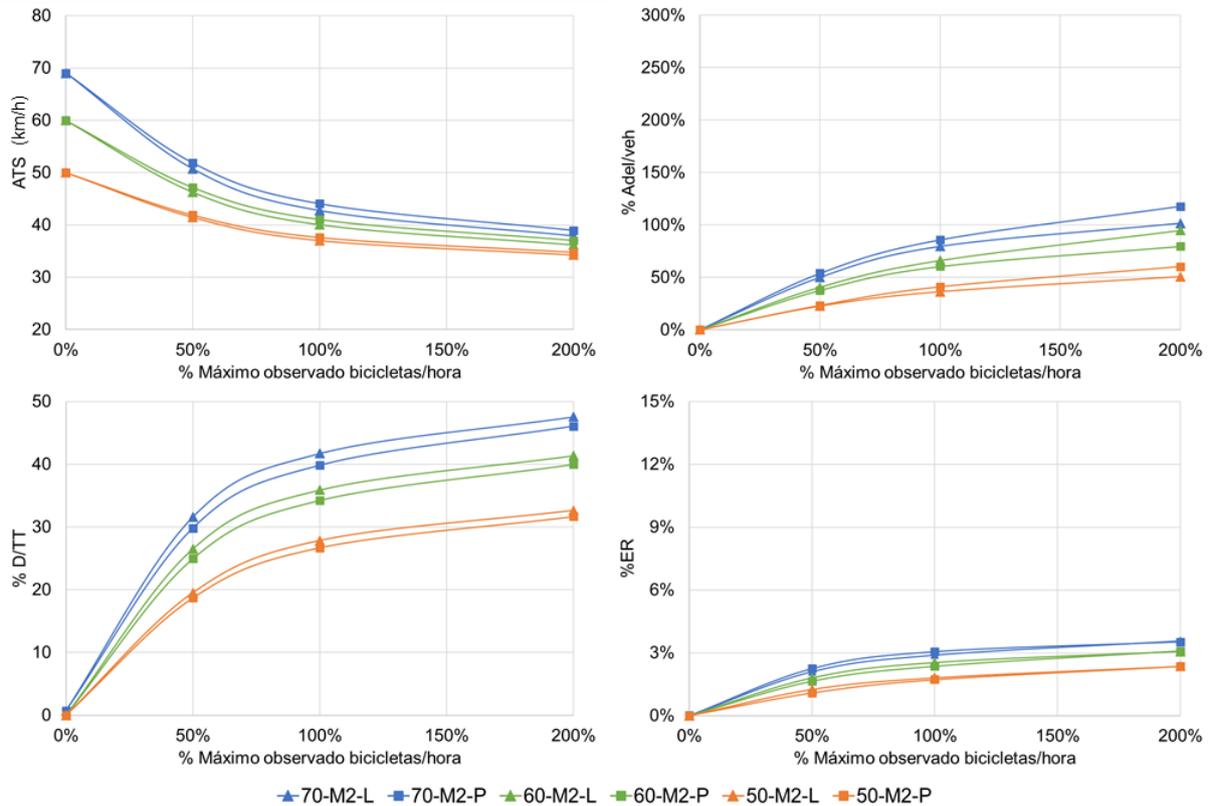


Figura 7. Medidas de desempeño (ATS, %Adel/veh, %D/TT y %ER) correspondientes al nivel de tráfico motorizado M2 considerando variaciones en la intensidad ciclista y en la velocidad límite del tramo de carretera.

En general, al reducir la velocidad límite del tramo de carretera la velocidad media de recorrido del tramo se ve reducida, siendo esta reducción menor a medida que aumenta la intensidad ciclista. A velocidades límite más elevadas se registran más adelantamientos por vehículo, pero el tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo también es más elevado. En cuanto al nivel de exposición al riesgo, al reducir la velocidad límite del tramo este se reduce. La configuración de los grupos de ciclistas en paralelo presenta mejores resultados de todas las medidas de desempeño analizadas.

3.2.2 MG2: Gestión de la velocidad durante el adelantamiento

Para poder simular esta medida de gestión se ha realizado unas modificaciones específicas en Aimsun Next. Este software dispone de un parámetro que permite regular la velocidad durante el adelantamiento cuando la diferencia de velocidades entre adelantado y adelantante supera un umbral. Este parámetro está pensado para simular casos en los que se permite un aumento de velocidad solamente durante el adelantamiento, sin embargo, en esta investigación se utilizará para el caso opuesto, simulando una reducción de velocidad durante el adelantamiento.

Para analizar qué influencia tendrá sobre la operación de la carretera la reducción de velocidad durante el adelantamiento a bicicletas se van a simular dos escenarios variando estos parámetros. En el primer escenario se mantienen los parámetros calibrados con datos reales de campo, forzando a los vehículos a respetar la velocidad límite de la carretera, y el parámetro que permite aumentar la velocidad durante el adelantamiento en este caso es igual a 1, indicando así que no se permite sobrepasar la velocidad límite durante el adelantamiento. Los parámetros que controlan la maniobra de adelantamiento para este primer escenario se muestran en la Figura 8.

<input checked="" type="checkbox"/> Two-Way Two-Lane Overtaking Model			
Delay Time Threshold:	0.00 sec	Number of Simultaneous Overtakings Allowed:	5
Minimum Speed Difference Threshold:	10.00 km/h	Delay Between Simultaneous Overtakings:	0.00 sec
Maximum Speed Difference Threshold:	35.00 km/h	Sensitivity Factor for Reduced Car Following:	0.65
Maximum Rank:	3	Overtaking Speed Enhancement Factor:	1.00
Remaining Travel Time Threshold:	5.00 sec	Speed Difference Threshold for Enhanced Overtaking Speed:	45.00 km/h

Figura 8. Parámetros considerados en el escenario con velocidad límite igual a la observada en el tramo.

En el segundo escenario se simuló el mismo tramo de carretera con la misma carga de tráfico, pero forzando a los vehículos a reducir su velocidad en 20 km/h cuando adelanten a bicicletas. Para simular este comportamiento el parámetro de mejora de la velocidad durante el adelantamiento tomó el valor de 0.71, lo que representa una reducción de la velocidad de 20 km/h, pasando de 70 km/h a 50 km/h durante las maniobras de adelantamiento a bicicletas.

Para asegurar este comportamiento en los adelantamientos a bicicletas se aumentó el umbral de la diferencia de velocidades entre usuarios hasta 45 km/h, forzando a que los vehículos ligeros adelanten a las bicicletas reduciendo su velocidad en 20 km/h durante el adelantamiento. Los valores de los parámetros que regulan la maniobra de adelantamiento en este escenario 2 se muestran en la Figura 9.

<input checked="" type="checkbox"/> Two-Way Two-Lane Overtaking Model			
Delay Time Threshold:	0.00 sec	Number of Simultaneous Overtakings Allowed:	5
Minimum Speed Difference Threshold:	10.00 km/h	Delay Between Simultaneous Overtakings:	0.00 sec
Maximum Speed Difference Threshold:	35.00 km/h	Sensitivity Factor for Reduced Car Following:	0.65
Maximum Rank:	3	Overtaking Speed Enhancement Factor:	0.71
Remaining Travel Time Threshold:	5.00 sec	Speed Difference Threshold for Enhanced Overtaking Speed:	45.00 km/h

Figura 9. Parámetros considerados en el escenario con velocidad de adelantamiento reducida en 20 km/h en relación a la velocidad límite del tramo.

A nivel microscópico, observando el comportamiento de cada usuario, también se han visto afectados los resultados. La Tabla 7 muestra los valores de las duraciones medias de los adelantamientos a los diferentes grupos de ciclistas registradas en cada uno de los dos escenarios simulados, así como la variación registrada en las duraciones a cada tipo de agrupación ciclista. Las duraciones de los adelantamientos a cada grupo de ciclistas han aumentado al forzar a los vehículos a reducir su velocidad en 20 km/h en el momento de adelantar a los ciclistas. Las duraciones han aumentado en

promedio un 56% respecto del escenario anterior, donde se podía adelantar a ciclistas circulando a la velocidad límite de la carretera.

Escenario de velocidad de adelantamiento	Individual	2L	4L	10L	2P	4P	10P
Velocidad límite de 70 km/h	5.31 s	6.74 s	8.32 s	9.28 s	6.03 s	6.14 s	7.00 s
50 km/h (reducción de 20km/h)	8.33 s	10.45 s	12.90 s	14.38 s	9.29 s	9.54 s	10.95 s
Variación	57%	55%	56%	55%	54%	55%	56%

Tabla 7. Duraciones medias del adelantamiento(s) a los diferentes grupos de ciclistas considerando los dos escenarios, y variación entre el escenario 1 y el 2.

Los resultados de las medidas de desempeño considerando estos dos escenarios se muestran en la Figura 10. En esta figura también se muestran los resultados del escenario correspondiente a la reducción a 50 km/h de la velocidad límite de todo el tramo, con el fin de comparar los resultados obtenidos al aplicar las diferentes medidas de gestión. Concretamente, en la Figura 10, se representa en azul los resultados del escenario con velocidad límite de 70 km/h incluido el adelantamiento, en naranja oscuro se representa el escenario en el que la velocidad límite del tramo es de 50 km/h, y en naranja claro se representan los resultados del escenario donde la velocidad límite del tramo es de 70 km/h menos en los adelantamientos a ciclistas donde es de 50 km/h.

La velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados (ATS) se ve reducida al aplicar una reducción en la velocidad durante el adelantamiento a los ciclistas. Esta reducción es más acusada a medida que aumenta la intensidad de ciclistas en el tramo. Sin embargo, la ATS se ve afectada en menor grado cuando solo se reduce la velocidad durante el adelantamiento que cuando se reduce la velocidad límite del tramo. En este caso, la configuración de los grupos de ciclistas en paralelo presenta una velocidad media de recorrido mayor que cuando circulan en línea.

Respecto al porcentaje de adelantamientos realizado por vehículo, al reducir la velocidad solamente durante el adelantamiento se ha registrado un número de adelantamientos similar o incluso ligeramente mayor que al mantener la velocidad límite en 70 km/h. Por otra parte, si se compara la reducción de la velocidad solamente durante el adelantamiento con la reducción durante todo el tramo, se observa que la segunda opción genera un menor porcentaje de adelantamientos por vehículo.

En el gráfico inferior izquierda de la Figura 10 se observan los resultados del porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo. Al reducir la velocidad solamente durante el adelantamiento este %D/TT se ve aumentado respecto a los otros dos escenarios donde se mantiene la velocidad límite del tramo o se reduce la velocidad límite del tramo. Cuando los grupos de ciclistas circulan en paralelo los resultados del %D/TT son menores que cuando circulan en línea en todos los casos.

El porcentaje de exposición al riesgo resultante de la aplicación de esta medida de reducción de la velocidad durante el adelantamiento es más elevado que el resultante de mantener la velocidad límite actual del tramo o que reducir la velocidad límite del tramo. Observando esta variable, cuando los

ciclistas circulan en paralelo se ha obtenido un valor menor del porcentaje de exposición al riesgo que cuando circulan en línea.

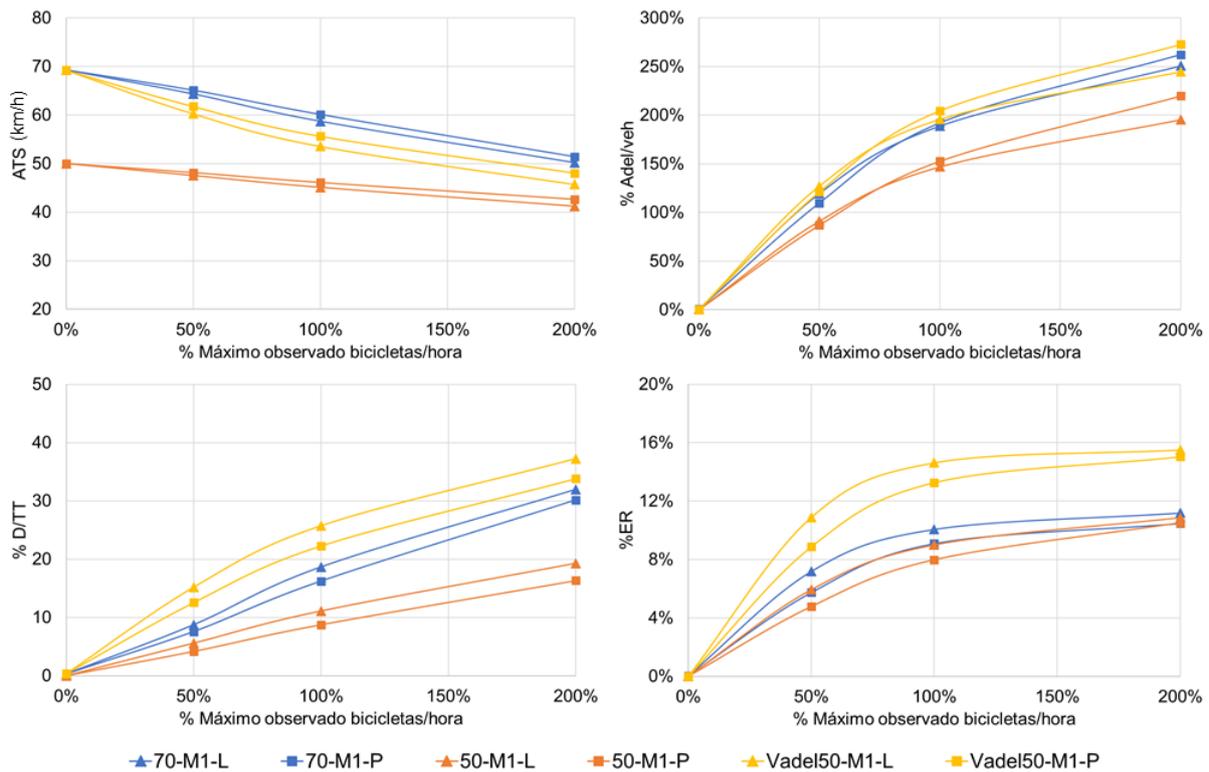


Figura 10. Medidas de desempeño (ATS, %Adel/veh, %D/TT y %ER) correspondientes al nivel de tráfico motorizado M1 considerando variaciones en la intensidad ciclista y en la velocidad límite durante el adelantamiento a los ciclistas.

En la Figura 11 se muestran las medidas de desempeño resultantes de aplicar la reducción de la velocidad durante el adelantamiento considerando un nivel de tráfico motorizado M2 correspondiente a la demanda de verano. Cuando el nivel de motorizados es elevado las diferencias entre mantener la velocidad límite del tramo y reducir la velocidad solamente durante el adelantamiento son menores.

En este caso, la velocidad media de recorrido (ATS) resulta ligeramente superior al mantener la velocidad límite en 70 km/h que al reducirla a 50 km/h solamente durante el adelantamiento a ciclistas. El porcentaje de adelantamientos realizados por vehículo (% Adel/veh) resulta superior al mantener la velocidad límite en 70 km/h que al reducirla solamente durante la maniobra de adelantamiento, ya que en el segundo caso las duraciones son superiores y por tanto se necesita un hueco mayor en el carril opuesto para realizar el adelantamiento.

El porcentaje de tiempo de demora respecto al tiempo de recorrido del tramo es superior cuando se reduce la velocidad durante la maniobra, creciendo de una manera más acusada para intensidades de ciclistas menores del 100% de la demanda máxima observada.

Finalmente, el porcentaje de exposición al riesgo en este caso, donde la demanda de motorizados es elevada, es bastante reducido para todos los escenarios simulados, esto se debe a que el número de

adelantamientos por vehículo también se ve reducido al aumentar la intensidad de motorizados y existir menos oportunidades de adelantamiento por falta de huecos en el sentido opuesto.

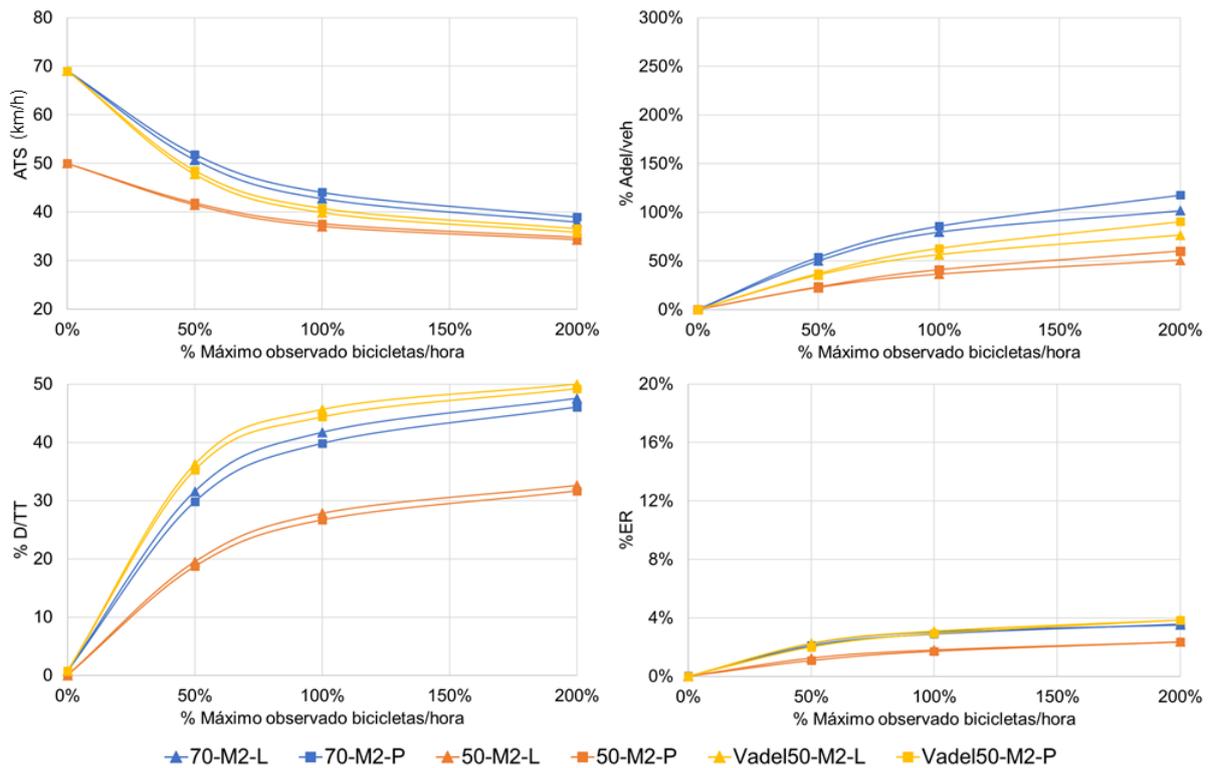


Figura 11. Medidas de desempeño (ATS, %Adel/veh, %D/TT y %ER) correspondientes al nivel de tráfico motorizado M2 considerando variaciones en la intensidad ciclista y en la velocidad límite durante el adelantamiento a los ciclistas.

En resumen, los resultados han mostrado que la aplicación de la reducción en la velocidad solamente durante el adelantamiento a ciclistas ha generado una reducción en la velocidad media de recorrido del tramo, un aumento en el tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo y una reducción en el número de adelantamientos realizados por vehículo. Esta medida también ha generado un aumento medio en las duraciones de los adelantamientos a los diferentes grupos de ciclistas de alrededor del 60%, aumentando así el tiempo en el que los vehículos adelantantes circulan por el carril opuesto incrementando el nivel de exposición al riesgo de colisión frontal con los vehículos que circulan en el sentido opuesto.

Por tanto, esta medida, aunque a priori puede estar del lado de la seguridad del ciclista, al incrementar la duración del adelantamiento aumenta el nivel de exposición al riesgo de colisión frontal con los vehículos que circulan en el sentido opuesto, afectando a la seguridad y funcionalidad del tráfico.

Por tanto, en términos globales de la exposición al riesgo, la implantación de esta medida implica un aumento del nivel de exposición al riesgo debido a una mayor proporción del recorrido con la circulación de los vehículos por el carril opuesto durante el adelantamiento a ciclistas, siendo poco recomendable su aplicación.

3.2.3 MG3: Gestión del tráfico: tamaño y configuración del grupo de ciclistas

En este apartado se determina cómo afecta el tamaño de los grupos de ciclistas y la configuración en la que circulan a las diferentes medidas de desempeño que caracterizan la funcionalidad del tráfico y la seguridad. Con este fin, se ha desarrollado un análisis de diferentes escenarios de tráfico utilizando el modelo de microsimulación del tráfico desarrollado para el tramo de carretera de la CV-502.

En la Tabla 8 se muestran los escenarios de tráfico ciclista diseñados considerando tres volúmenes de ciclistas y su agrupación en diferentes tamaños del grupo y configuración. Los tres volúmenes considerados representan una demanda baja de ciclistas, correspondiente a 60 ciclistas/hora, una demanda media, correspondiente a 200 ciclistas/hora, y finalmente, una demanda elevada correspondiente a 600 ciclistas/hora.

Nº de ciclistas en el grupo	Demanda ciclista baja				Demanda ciclista media				Demanda ciclista alta			
1	60	0	0	0	200	0	0	0	600	0	0	0
2P/2L	0	30	0	0	0	100	0	0	0	300	0	0
4P/4L	0	0	15	0	0	0	50	0	0	0	150	0
10P/10L	0	0	0	6	0	0	0	20	0	0	0	60
Total ciclistas/hora	60	60	60	60	200	200	200	200	600	600	600	600

Tabla 8. Escenarios de tráfico ciclista según tamaño del grupo y configuración (ciclistas/h).

La Figura 12 muestra los resultados de las medidas de desempeño obtenidas considerando una intensidad de vehículos motorizados M1 correspondiente a la observada en campo. Se representan en azul las medidas de desempeño correspondientes a la intensidad de ciclistas baja, en verde a la intensidad de ciclistas media y en naranja a la intensidad de ciclistas elevada. También se diferencia entre la configuración de los grupos de ciclistas circulando en línea, representada con un triángulo, y en paralelo, representada con un cuadrado.

El gráfico superior izquierdo de la Figura 12 corresponde con la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados (ATS), se observa como la ATS va aumentando a medida que los ciclistas se agrupan en grupos de mayor tamaño, mostrando un aumento más acusado cuando la intensidad de ciclistas es más elevada. Respecto a la configuración de los grupos en línea o en paralelo, cuando la intensidad de ciclistas es mayor la circulación de los grupos en paralelo presenta una ATS más elevada que cuando circulan en línea.

El gráfico superior derecho de la Figura 12 representa el porcentaje de adelantamientos realizado por vehículo motorizado. Para intensidades de ciclistas baja y media, el porcentaje de adelantamientos por vehículo decrece a medida que aumenta el tamaño del grupo de ciclistas, ya que es necesario realizar menos maniobras para adelantar al mismo número de ciclistas debido a que circulan agrupados.

En cambio, cuando la intensidad de ciclistas es elevada el número de adelantamientos por vehículo aumenta para grupos de tamaño medio, y se reduce para grupos de tamaño grande. Esto se debe a que el elevado número de ciclistas circulando de manera individual entorpece la circulación de los motorizados generando colas que dificultan el adelantamiento, y cuando estos circulan en grupos de

tamaño medio el adelantamiento se ve favorecido siendo necesaria una menor duración que para adelantar a los grupos grandes y muchas menos maniobras que para adelantar a individuales.

El gráfico inferior izquierdo de la Figura 12 representa el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo de los vehículos motorizados. Esta medida de desempeño disminuye a medida que los ciclistas se agrupan en grupos de mayor tamaño para las tres intensidades ciclistas simuladas. Sin embargo, a medida que la intensidad ciclista es mayor el %D/TT también lo es, y su variación al aumentar el tamaño de los grupos es más acusada. Respecto a la configuración de los grupos de ciclistas, cuando circulan en paralelo el %D/TT es menor que cuando circulan en línea.

El gráfico inferior derecha de la Figura 12 muestra el porcentaje de exposición al riesgo de los vehículos motorizados durante su recorrido del tramo de carretera. En este caso, el %ER es proporcional al % de adelantamientos realizado por vehículo.

Para las intensidades baja y media de ciclistas el %ER disminuye al aumentar el tamaño de los grupos de ciclistas debido a que son necesarias menos maniobras de adelantamiento para adelantarles. Cuando la intensidad de ciclistas es elevada, el porcentaje de exposición al riesgo aumenta con el tamaño de los grupos de ciclistas, ya que cuando existen muchos ciclistas circulando individualmente las opciones de adelantarles se reducen respecto a los mismos ciclistas circulando en grupos grandes. Esta medida de desempeño presenta mejores valores cuando los grupos circulan en paralelo que cuando circulan en línea.

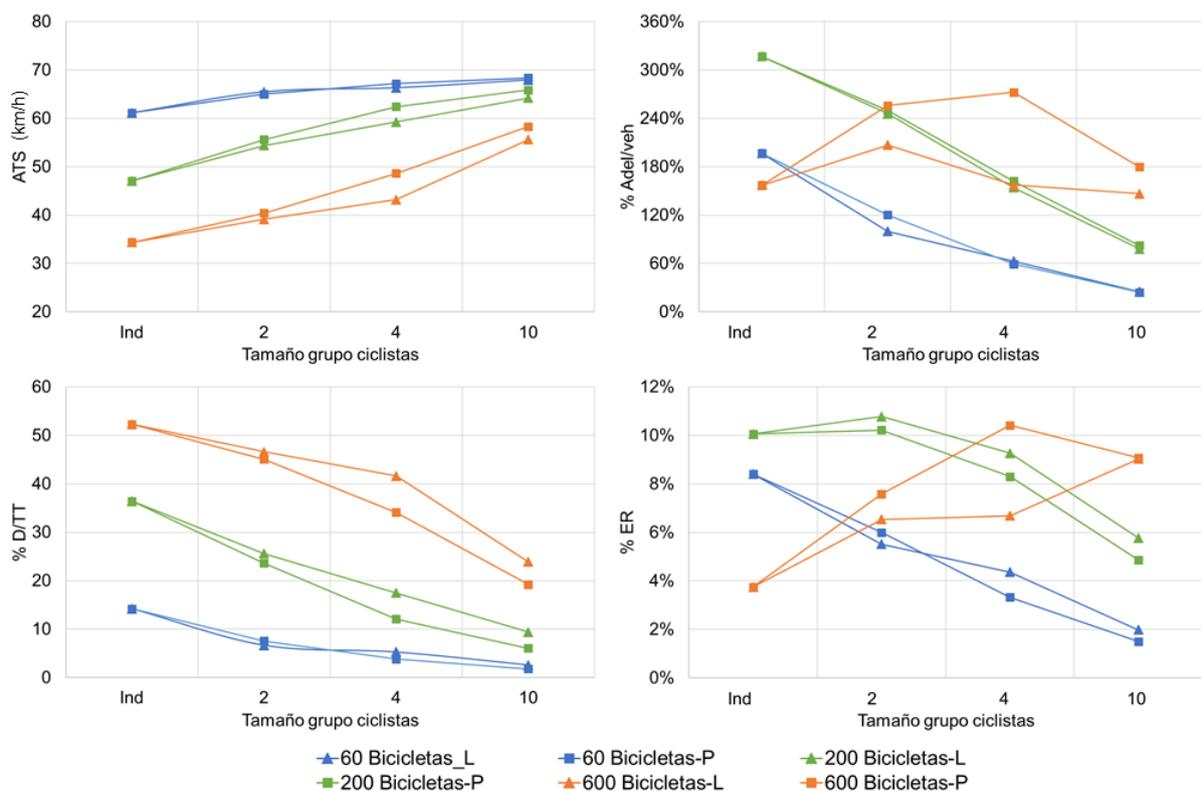


Figura 12. Medidas de desempeño (ATS, %Adel/veh, %D/TT y %ER) correspondientes al nivel de tráfico motorizado M1 considerando variaciones en el número de ciclistas y su configuración en grupos.

La Figura 13 muestra los resultados de las medidas de desempeño obtenidas considerando el nivel de tráfico motorizado M2 correspondiente al incremento de vehículos registrado en verano. Se representan, al igual que en la Figura 12, en azul la intensidad baja de ciclistas, en verde la media y en naranja la elevada.

En este caso, el gráfico de la velocidad media de recorrido se presenta en la parte superior izquierda, y se observa como el propio hecho de aumentar la demanda de motorizados ya disminuye la ATS. Grupos de mayor tamaño presentan una ATS más elevada, siendo esta variación mayor para demandas menores de ciclistas.

El porcentaje de adelantamientos por vehículo se representa en el gráfico superior derecha de la Figura 13 considerando un nivel elevado de intensidad de motorizados. El comportamiento de esta variable es similar a la de la Figura 12, donde la intensidad de motorizados era menor. El %Adel/veh disminuye al agruparse los ciclistas en grupos de mayor tamaño para demandas bajas y medias de ciclistas, mientras que para demandas elevadas el número de adelantamientos es mayor para tamaños de grupo intermedio.

El gráfico inferior izquierda de la Figura 13 muestra el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo de los vehículos motorizados. Se observa una reducción de esta variable a medida que los ciclistas se agrupan en grupos de mayor tamaño, esta reducción es más notable para demandas bajas de ciclistas. Los grupos de ciclistas circulando en paralelo presentan unos resultados menores del %D/TT que cuando circulan en línea.

El porcentaje de exposición al riesgo se muestra en el gráfico inferior derecho, donde se ve observan unos resultados de %ER bastante reducidos para todas las intensidades de ciclistas simuladas considerando todos los tamaños de grupo. Este %ER reducido se relaciona con el bajo porcentaje de adelantamientos registrado en este escenario donde la intensidad de motorizados es elevada.

Si se comparan los resultados obtenidos en la Figura 12 y la Figura 13 se observa una tendencia similar de los resultados de las medidas de desempeño, pero en el caso de la Figura 13, donde el nivel del tráfico motorizado es superior, el nivel de servicio de la vía se ve deteriorado solamente por el tráfico motorizado, siendo la afección de los ciclistas menor en cuanto al número de adelantamientos y a la exposición al riesgo, pero generando mayores reducciones en la ATS y aumentos en el tiempo de demora.

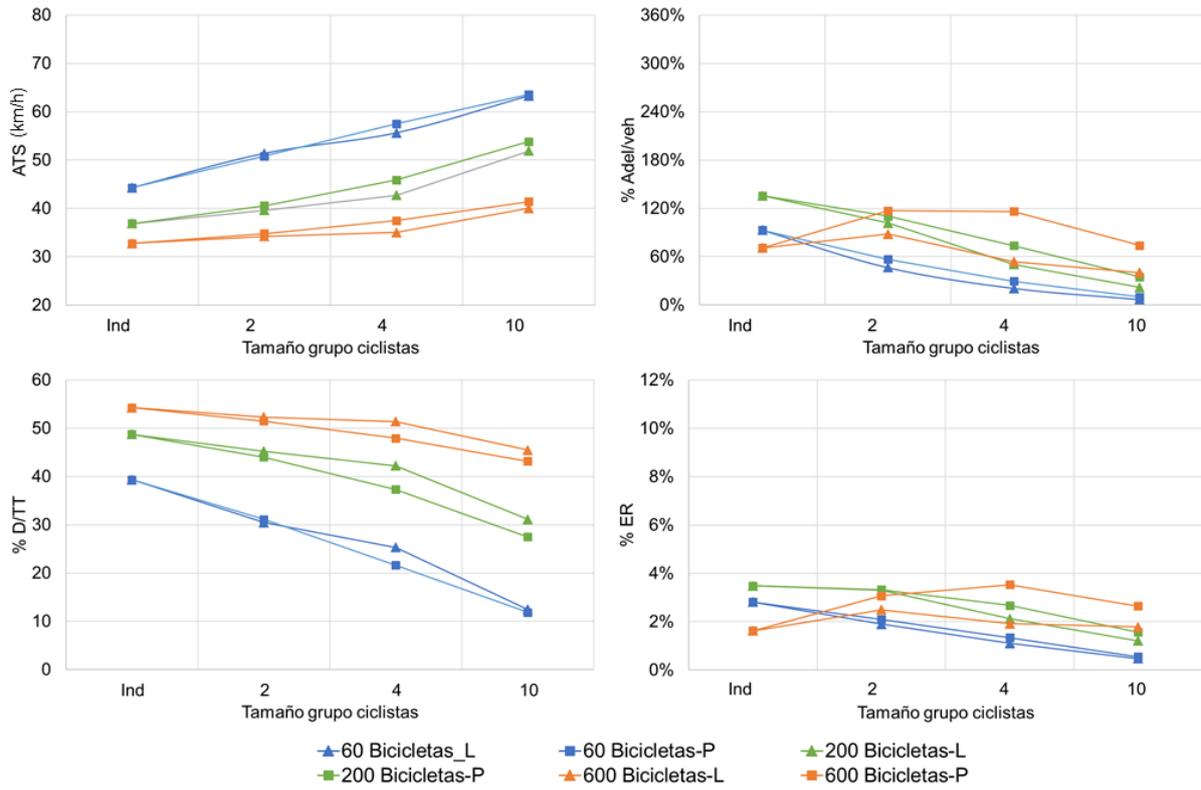


Figura 13. Medidas de desempeño (ATS, %Adel/veh, %D/TT y %ER) correspondientes al nivel de tráfico motorizado M2 considerando variaciones en el número de ciclistas y su configuración en grupos.

En general, la agrupación de los ciclistas en grupos mayores supone una mejora del nivel de servicio de la carretera y de la seguridad.

4 Aplicaciones de la investigación

Esta investigación es de carácter práctico y aplicado, presentando resultados que permiten realizar actuaciones con el fin de mejorar la funcionalidad y la seguridad del tráfico en carreteras con presencia de ciclistas.

La primera aplicación de esta investigación resulta en la definición de una serie de recomendaciones específicas para la gestión de la carretera piloto en la que se ha desarrollado la investigación.

Por otra parte, la metodología desarrollada en la presente investigación se presenta en forma de guía metodológica, de manera que permite su aplicación a otros tramos de carretera convencional con otras características tanto geométricas como de tráfico. La aplicación de esta guía metodológica permite la ampliación de la investigación a otras carreteras, ya que se aconseja implementar el estudio considerando las características específicas de cada carretera y de sus usuarios.

4.1 Recomendaciones de gestión en carreteras convencionales estrechas con tráfico ciclista

Con el fin de realizar una gestión eficaz y proponer medidas concretas que integren a ciclistas y conductores en las carreteras convencionales, se ha realizado un estudio específico de la configuración de los grupos de ciclistas, del tamaño de los grupos, de la velocidad a la que se realizan los adelantamientos y de la velocidad límite de la carretera.

A partir de los gráficos expuestos en el apartado 3.2, donde se muestra el efecto de cada medida de gestión planteada, según el nivel de tráfico, sobre las medidas de desempeño, se ha elaborado una serie de recomendaciones para la gestión de la vía. Estas recomendaciones están enfocadas a aumentar la funcionalidad del tráfico sin comprometer la seguridad de todos los usuarios presentes en la carretera, integrando a las bicicletas en las carreteras convencionales de una manera segura y eficiente.

La primera medida de gestión planteada corresponde con una reducción de la velocidad límite de la carretera. La reducción de la velocidad límite de la carretera penaliza la funcionalidad del tráfico motorizado, ya que se reduce la velocidad media de recorrido de los vehículos, aumentando la duración de los adelantamientos. Sin embargo, el número de adelantamientos realizados por vehículo se ve reducido, al interaccionar cada vehículo con menos ciclistas ya que circula a una velocidad menor. El tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo se ve reducido al disminuir el límite de velocidad de la vía, ya que los conductores esperan recorrer el tramo en un mayor tiempo.

En cuanto a la seguridad, esta medida está enfocada a aumentar la seguridad de los ciclistas, ya que los adelantamientos se realizarán a velocidades menores. Respecto a la seguridad de los conductores, la reducción del límite de velocidad supone duraciones mayores del adelantamiento, pero al mismo tiempo también supone una reducción del número de adelantamiento realizados, reduciendo por esta parte la exposición al riesgo. Por tanto, la exposición al riesgo de los conductores, desde el punto de vista de la seguridad, debe de analizarse ponderando estos dos factores y calculando el porcentaje de tiempo de exposición al riesgo respecto al tiempo de recorrido del tramo (%ER), el cual se ve reducido

al disminuir el límite de velocidad de la vía. El efecto de esta medida es similar para diferentes niveles de tráfico motorizado y ciclista. Por tanto, reducir la velocidad límite de la carretera mejora la seguridad de todos los usuarios, sin comprometer en exceso la funcionalidad.

La segunda medida de gestión propuesta consiste en la reducción de la velocidad solamente durante el adelantamiento a ciclistas. En vista de los resultados de las simulaciones se observa que reducir la velocidad solamente durante la maniobra de adelantamiento a ciclistas comporta una ligera reducción de la funcionalidad del tráfico al disminuir la velocidad media de recorrido y aumentar el tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo. Esta medida supone un aumento evidente del nivel de exposición al riesgo de los motorizados debido al mayor porcentaje de tiempo en el que un vehículo debe circular por el carril opuesto mientras adelanta a ciclistas, esto se debe a que el porcentaje de adelantamiento permanece constante mientras las duraciones del adelantamiento aumentan considerablemente.

Por otra parte, cuando el nivel de tráfico motorizado es elevado esta medida carece de efecto, ya que se reduce la posibilidad de adelantar al ser necesario un mayor tiempo para realizar la maniobra. En resumen, esta medida, a pesar de estar enfocada a la mejora de la seguridad de los ciclistas al realizarse los adelantamientos a menor velocidad, supone un empeoramiento tanto de la funcionalidad del tráfico como de la seguridad, siendo no recomendable.

La tercera medida de gestión analizada en esta investigación corresponde con la disposición de los ciclistas según tamaño de grupo y configuración en línea o en paralelo. En vista de los resultados presentados en el apartado 3.2.3, se recomienda que los ciclistas se agrupen en grupos de mayor tamaño, ya que así se requiere realizar un menor número de maniobras de adelantamiento, y al mismo tiempo se genera menor demora y menor exposición al riesgo.

Sin embargo, cuando el nivel de tráfico ciclista es elevado se recomienda agrupar a los ciclistas en grupos de tamaño medio, llegando así a un equilibrio entre el número de adelantamientos a realizar y la duración de los mismos. En cuanto a la configuración de los grupos de ciclistas en línea o en paralelo, en vista de todos los resultados aportados en esta investigación, se concluye que la configuración en paralelo de los grupos de ciclistas supone en todos los casos una mayor funcionalidad del tráfico y un mayor nivel de seguridad, al mejorar el número de maniobras de adelantamiento realizadas aumentando así la velocidad media de recorrido del tramo y reduciendo el tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido.

La circulación en paralelo en general también reduce el porcentaje de exposición al riesgo, ya que a pesar de realizarse más adelantamientos las duraciones de estos son menores respecto a la circulación en línea. Por tanto, en carreteras estrechas, la circulación de los grupos en paralelo supone una menor duración de la maniobra, facilitando que se produzcan adelantamientos, mejorando así la funcionalidad del tráfico en estas condiciones y, por tanto, sugiere la circulación de grupos de ciclistas en paralelo en carreteras estrechas.

Recomendaciones para la gestión de carreteras estrechas con tráfico ciclista:

- Reducir la velocidad límite del tramo cuando la demanda de ciclistas sea elevada. Esta reducción se puede realizar en tramos horarios en los que se espere una intensidad ciclista elevada, se aconseja realizar un estudio de demanda previo para identificar los patrones horarios de la demanda ciclista. Una solución innovadora sería incorporar una señal dinámica variable del límite de velocidad según el volumen ciclista presente en la carretera en cada momento, siendo necesario, para el correcto funcionamiento de la señal, desarrollar una metodología que permita un registro continuo del volumen de ciclistas en la carretera.
- Agrupación de ciclistas en grupos de mayor tamaño. Esta recomendación es difícil de poner en práctica, aunque se puede recomendar que se agrupen en la entrada del tramo de carretera.
- Circulación de los grupos de ciclistas en paralelo. Se ha comprobado que se requiere una menor duración del adelantamiento, mejorando así la funcionalidad de la vía y el nivel de exposición al riesgo. Se pueden incorporar carteles que recomienden a los grupos de ciclistas su circulación en paralelo en la entrada del tramo de carretera.

4.2 Guía metodológica para la implementación de la investigación en otros tramos de carretera

Las recomendaciones presentadas en el apartado 4.1 se refieren al tramo de carretera en el que se ha desarrollado la investigación, considerando sus características geométricas y de tráfico, tanto en volumen como en comportamiento de los usuarios. Estas recomendaciones pueden aplicarse a tramos de carretera convencional con características geométricas y de tráfico similares, donde la aplicación de las medidas presentadas generará efectos con el mismo signo que los resultados de esta investigación.

Dado el carácter práctico y aplicado de esta investigación, esta puede ampliarse y aplicarse específicamente a otros tramos de carretera con diferentes características. Para ello se presenta el segundo resultado aplicado de esta investigación: la elaboración de una guía metodológica para ampliar el estudio a otros tramos de carretera.

En la Figura 14 se muestra el diagrama de flujo a seguir para implementar la metodología de estudio específicamente a otro tramo de carretera convencional. A continuación, se explican los pasos a seguir.

En primer lugar, se comprueban las características físicas o geométricas del tramo de carretera. Si el nuevo tramo dispone de una geometría similar a los tramos ya modelizados se puede partir de estos modelos, mientras que si el nuevo tramo presenta una geometría diferente es necesario crear un nuevo modelo. Un ejemplo en el que sería necesario generar un modelo nuevo sería para analizar tramos de carretera convencional con pendiente elevada. En estos tramos el comportamiento de los usuarios es diferente, sobre todo el de los ciclistas, que se ven muy afectados por la pendiente, presentando variaciones de su velocidad en función de la pendiente ascendente o descendente del tramo de carretera. En este caso se debería de incorporar esta variable al modelo, desarrollando un modelo de variación de la velocidad en función de la pendiente, y calibrándolo y validándolo con observaciones en campo. Esta cuestión se contempla como línea futura de investigación.

El segundo paso es obtener datos de tráfico, tanto de bicicletas como de vehículos motorizados. Para calibrar y validar el modelo de microsimulación del tráfico es necesario obtener datos a nivel microscópico de duraciones de los adelantamientos considerando diferentes agrupaciones de ciclistas, y a nivel macroscópico o de sección, considerando las velocidades medias de recorrido (ATS) de cada tipología de usuarios y los porcentajes de usuarios en cola (PF) a la entrada y salida del tramo.

Respecto a los datos de duraciones de las maniobras de adelantamiento, no es necesario tomar datos en campo, ya que se puede utilizar el modelo predictivo de duración del adelantamiento desarrollado por Moll et al. (Moll, López, Rasch, et al., 2021) en base a observaciones realizadas mediante bicicletas instrumentadas circulando en 7 configuraciones diferentes del grupo de ciclistas, y llevada a cabo en 5 tramos diferentes de carretera convencional. El modelo bayesiano desarrollado permite realizar predicciones de duraciones de la maniobra de adelantamiento en carreteras con diferentes características geométricas y de tráfico, obteniendo las duraciones del adelantamiento para grupos de ciclistas formados por diferente número de ciclistas y configuración. Para utilizar este modelo predictivo de duraciones del adelantamiento es necesario disponer de inputs como los relativos a las características geométricas y de tráfico de la carretera (ancho carril y arcén, velocidad límite, IMD), a las características de los ciclistas (número de ciclistas en el grupo, circulación en línea o en paralelo), y los relacionadas con la propia maniobra de adelantamiento (separación lateral, presencia de vehículo opuesto, ...).

En cuanto a los datos a nivel macroscópico, si son similares a los observados en los modelos ya validados, se pueden utilizar estos, mientras que, si se observa una variación, es necesario obtener nuevos datos de campo para calibrar y validar el modelo en Aimsun Next. Los datos macroscópicos o de sección necesarios son la distribución de velocidades medias de recorrido del tramo de cada tipología de usuarios (coches, y diferentes agrupaciones de ciclistas), y el porcentaje de usuarios en cola en los extremos del tramo de carretera. Se aconseja tomar datos en campo durante un periodo de tiempo suficiente para registrar una muestra representativa de vehículos y bicicletas que permita caracterizar correctamente el tráfico.

Una vez registrados todos los datos necesarios, se procede a la calibración y validación del modelo de microsimulación del tráfico. Los procesos de calibración y validación utilizando datos observados específicos de las interacciones de conductores y ciclistas se pueden consultar en (Moll, López, & García, 2021), donde también se dispone de información relativa a las tomas de datos a nivel microscópico y macroscópico.

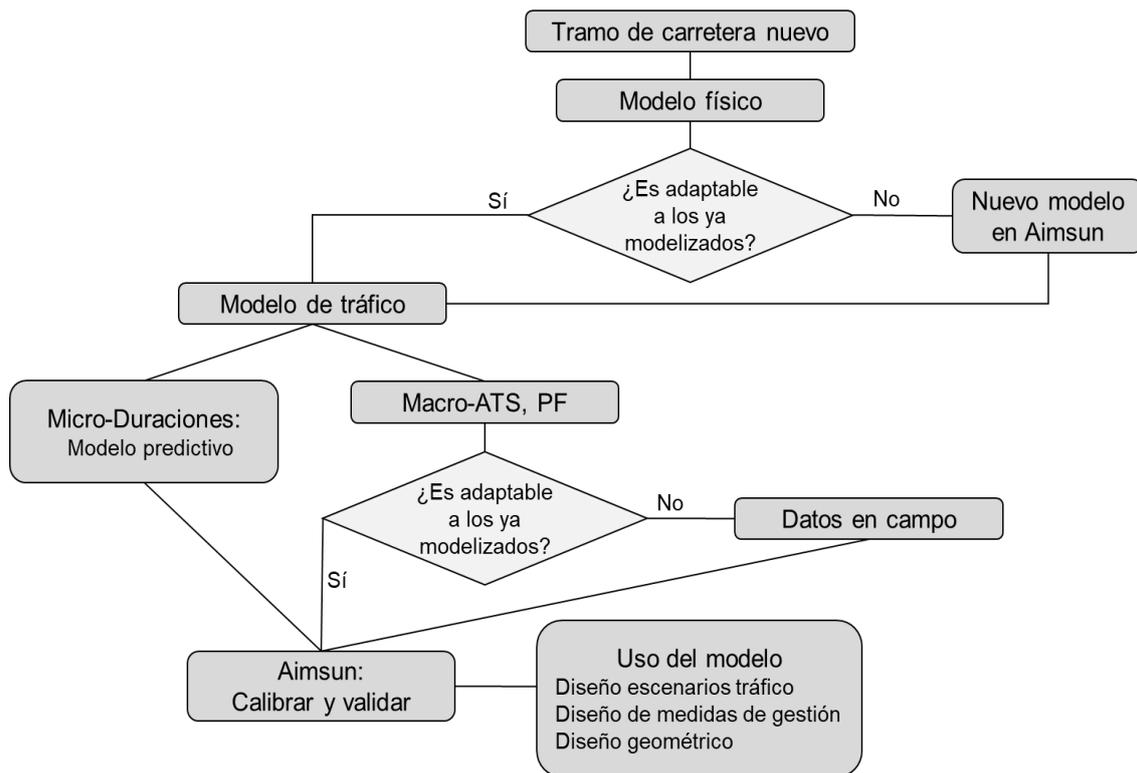


Figura 14. Diagrama de flujo para implementar la metodología de investigación en otros tramos de carretera.

El último paso, una vez se dispone del modelo de microsimulación debidamente calibrado y validado específicamente para un tramo de carretera, es el uso del modelo. El modelo puede ser utilizado para simular las medidas de gestión planteadas en esta investigación, viendo cómo evoluciona la seguridad y la funcionalidad del tráfico al aplicar diferentes medidas, contemplando variaciones en el tráfico, tanto de vehículos motorizados como de bicicletas.

El modelo de microsimulación de tráfico también permite simular nuevas medidas de gestión diferentes a las planteadas en esta investigación, como variaciones geométricas de la vía tales como incorporaciones de apartaderos para ciclistas que faciliten el adelantamiento, o restricciones del tráfico motorizado o ciclista en determinados momentos.

Esta guía metodológica se basa en el uso de la microsimulación del tráfico, que permite evaluar diferentes medidas de gestión sin comprometer la seguridad de los usuarios, obteniendo medidas de gestión validadas específicamente para cada carretera convencional, de manera que se aumente la seguridad del tramo de carretera y la funcionalidad del tráfico considerando a todos los usuarios presentes en las carreteras convencionales.

5 Conclusiones

La presencia de ciclistas en las carreteras convencionales del territorio español es un fenómeno muy habitual, que tiene repercusión tanto desde el punto de vista de la seguridad vial, como de la operación del tráfico. Los ciclistas circulan tanto individualmente como en grupo (según diferentes configuraciones), y hacen uso de las carreteras tanto días laborables como festivos. Por ello, cómo gestionar de un modo eficiente este tipo de vías es uno de los retos a los que se enfrentan las Administraciones gestoras de estas infraestructuras. La carencia de datos de demanda de los diferentes usuarios que hacen uso de la infraestructura, así como de herramientas específicas que ayuden en la gestión del nuevo tráfico que las transita, dificulta el establecimiento de medidas específicas que puedan mejorar la seguridad vial del colectivo ciclista.

En los últimos años se han llevado a cabo investigaciones específicas enfocadas al estudio de la interacción entre usuarios y en cómo llevar a cabo una integración eficiente. En el presente trabajo de investigación se da un paso más allá, utilizando los conocimientos previamente adquiridos por parte del grupo de investigación, se propone el uso de indicadores concretos para evaluar la afección sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico causada por la presencia de ciclistas en este entorno; y se proporciona una herramienta para una gestión eficaz de estas infraestructuras. Todo ello en base a un estudio experimental con tomas de datos en campo y con el uso de herramientas de microsimulación del tráfico.

Para alcanzar el objetivo propuesto ha sido necesario caracterizar la circulación de ciclistas en carreteras convencionales teniendo en cuenta a los grupos de ciclistas, así como su interacción con el tráfico motorizado, especialmente durante las maniobras de adelantamiento. Se ha adaptado un modelo de microsimulación del tráfico que permite la incorporación del tráfico de ciclistas en carreteras convencionales y su interacción con los vehículos motorizados. Este modelo se ha calibrado y validado con datos observados en campo (mediante el empleo de bicicletas instrumentadas con diferentes dispositivos, así como tomas de datos estáticas), permitiendo obtener medidas de desempeño que han caracterizado correctamente la afección sobre la funcionalidad del tráfico causada por los ciclistas en carreteras convencionales, así como la afección sobre la seguridad.

Mediante el uso del modelo de microsimulación del tráfico se han evaluado varias medidas de gestión con el fin de mejorar la seguridad y la funcionalidad del tráfico, considerando diferentes niveles de tráfico motorizado y ciclista. Las medidas de desempeño utilizadas caracterizan correctamente el fenómeno bajo análisis, presentando suficiente sensibilidad a la circulación de ciclistas en este entorno. Concretamente se han utilizado el porcentaje de adelantamientos realizados por vehículo, la velocidad media de recorrido del tramo y el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo total de recorrido del tramo para caracterizar la funcionalidad del tráfico. En cuanto a la seguridad, se ha utilizado para caracterizarla el porcentaje de exposición al riesgo que represente el tiempo en el que un vehículo debe de circular por el carril opuesto respecto del tiempo de recorrido del tramo. A partir de los resultados obtenidos en este estudio, se han propuesto recomendaciones y mejoras que permiten integrar a los ciclistas en las carreteras convencionales de manera segura y eficaz.

De esta manera la presente investigación concluye, dejando abierta la puerta a futuras mejoras, como aplicaciones de la metodología en otros tramos de carretera y simulaciones de otras medidas de gestión diferentes a las planteadas en este estudio.

Por otra parte, algunas de las medidas propuestas están relacionadas con una gestión de la velocidad. Sin embargo, la gestión de la velocidad debe ser dinámica en función del flujo de usuarios que usen la infraestructura en cada momento. Por ello, el desarrollo de la señalización dinámica propuesta como recomendación. Finalmente cabe destacar que todas las medidas propuestas están enfocadas a mejorar la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con tráfico mixto de bicicletas y vehículos motorizados.

6 Agradecimientos

Este trabajo de investigación forma parte del proyecto de investigación Bike2lane “Mejora de la seguridad y operación de carreteras convencionales con ciclistas”, con referencia TRA 2016-8089-R, subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

En el desarrollo de esta tesis también se han utilizado datos de parte del proyecto de investigación Safe4Bikes “Medidas para la Mejora de la Seguridad Vial en Carreteras Convencionales con Bicicletas Circulando en Grupo”, con referencia SPIP2017-022880, subvencionado por la Dirección General de Tráfico.

Esta investigación ha sido realizada gracias a la Agencia Estatal de Investigación “Ayudas para contratos predoctorales para la formación de doctores 2017”, con referencia BES-2017-080474, de la que una de las autoras es beneficiaria.

Las tomas de datos en campo fueron realizadas gracias a la cooperación de la Dirección General de Tráfico y al Área de Carreteras de la Diputació de València y a la Generalitat Valenciana.

Finalmente, los autores quieren agradecer a Aimsun SLU su colaboración en el desarrollo del estudio de microsimulación de tráfico.

7 Referencias

Aimsun. (2022). *Aimsun Next*. <https://www.aimsun.com/es/aimsun-next/>

Barceló, J. (2010). Fundamentals of Traffic Simulation. In J. Barceló (Ed.), *International Series in Operations Research & Management Science* (Vol. 145). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>

Diputació de València. (2021). *Libro de aforos*. <http://www.dival.es/es/carreteras/>

Dirección General de Tráfico. (2019). *Estrategia Estatal por la Bicicleta. Documento ejecutivo*. 26.

Dirección General de Tráfico. (2020). *Las principales cifras de la Siniestralidad Vial España 2020*.

- Llorca, C., Moreno, A. T., Lenorzer, A., Casas, J., & Garcia, A. (2015). Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.06.001>
- Ministerio de Cultura y Deporte. (2021a). *Anuario de estadísticas deportivas 2021*.
- Ministerio de Cultura y Deporte. (2021b). Encuesta de Hábitos Deportivos en España 2020. Síntesis de resultados. *Boletín Oficial Del Estado*, 25. https://www.mecd.gob.es/servicios-al-ciudadano-mecd/dms/mecd/servicios-al-ciudadano-mecd/estadisticas/deporte/ehd/Encuesta_de_Habitos_Deportivos_2015_Sintesis_de_Resultados.pdf
- Ministerio del Interior. (2003). Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Circulación para la aplicación y desarrollo del texto articulado de la Ley sobre tráfico, circulación de vehículos a motor y seguridad vial, aprobado por el Real De. *Boletín Oficial Del Estado (BOE)*, pp.45684-45772. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2003-23514>
- Moll, S. (2021). *Análisis de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas* [Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/179701>
- Moll, S., López, G., & García, A. (2021). Analysis of the influence of sport cyclists on narrow two-lane rural roads using instrumented bicycles and microsimulation. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/su13031235>
- Moll, S., López, G., Rasch, A., Dozza, M., & García, A. (2021). Modelling duration of car-bicycles overtaking manoeuvres on two-lane rural roads using naturalistic data. *Accident Analysis and Prevention*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106317>
- Organización de Naciones Unidas. (2015). Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización. *Naciones Unidas*, 1(1), 1–88. <https://undocs.org/es/A/70/1>
- Transportation Research Board. (2022). *Highway Capacity Manual 7th Edition*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26432>