

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Infraestructuras de Transporte y Territorio



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

**Análisis de la funcionalidad del tráfico en
carreteras convencionales con presencia de
ciclistas**

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

SARA MOLL MONTANER

Dirigida por:

Prof. Dr. ALFREDO GARCÍA GARCÍA

Prof. Dr. GRISELDA LÓPEZ MALDONADO

Octubre 2021

Resumen

Análisis de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas

La presencia de ciclistas deportivos en carreteras convencionales es un fenómeno habitual en la actualidad. Los ciclistas circulan individualmente y en grupo, compartiendo la vía con los vehículos motorizados e interactuando con ellos. Debido a las diferencias en términos de velocidad, volumen y nivel de protección entre bicicletas y vehículos motorizados, la maniobra de adelantamiento es la interacción más frecuente y de mayor riesgo. Por tanto, la presencia de ciclistas en carreteras convencionales puede afectar tanto desde el punto de vista de la seguridad vial, como desde el punto de vista de la funcionalidad del tráfico.

El principal objetivo de esta investigación es la caracterización del tráfico ciclista y su interacción con los vehículos a motor, en especial en maniobras de seguimiento y adelantamiento, a partir de observaciones naturalísticas del fenómeno, mediante el uso de bicicletas instrumentadas y de observaciones puntuales en tramos de estudio previamente seleccionados. El estudio se ha realizado considerando ciclistas circulando individualmente y en grupo por tramos de carreteras convencionales con diferentes características, tanto geométricas como de tráfico. Se han analizado un total de 2,135 maniobras de adelantamiento a ciclistas. La duración del adelantamiento se ha considerado un factor clave en cuanto a su efecto en la seguridad y en la funcionalidad del tráfico. En consecuencia, esta variable se ha analizado con especial interés, desarrollando un modelo predictivo de la duración del adelantamiento considerando factores relativos a la configuración de los grupos de ciclistas, a la carretera y a la propia maniobra de adelantamiento.

A partir de las observaciones realizadas, se ha adaptado, calibrado y validado un modelo de microsimulación del tráfico que incorpora el tráfico ciclista en carreteras convencionales y su interacción con los vehículos motorizados. Mediante las observaciones y el uso del modelo de microsimulación se han obtenido medidas de desempeño que permiten caracterizar la influencia de la presencia de ciclistas en la funcionalidad del tráfico, mostrando una reducción de la funcionalidad del tráfico al aumentar el tráfico ciclista. Las medidas de desempeño relacionadas con el número de adelantamientos y la demora son las más sensibles a la presencia de ciclistas, seguidas de las medidas relacionadas con el seguimiento entre usuarios. Las carreteras con secciones más estrechas son más sensibles a la presencia de ciclistas, y en ellas la configuración de los grupos en paralelo mejora ligeramente la funcionalidad del tráfico al facilitar los adelantamientos. Los resultados de esta investigación permiten una mejor comprensión del fenómeno, a la vez que se traducen en recomendaciones para la mejora del diseño y/o explotación de carreteras convencionales con presencia ciclista. Asimismo, se han desarrollado herramientas específicas como son el modelo predictivo y el modelo de microsimulación que pueden ser usadas por los gestores de la infraestructura para analizar otras carreteras y proporcionar una integración más segura y operativa de los diferentes usuarios de la misma.

Resum

Anàlisi de la funcionalitat del trànsit en carreteres convencionals amb presència de ciclistes

La presència de ciclistes esportius en carreteres convencionals és un fenomen habitual a l'actualitat. Els ciclistes circulen individualment i en grup, compartint la via amb els vehicles motoritzats i interaccionant amb ells. A causa de les diferències en termes de velocitat, volum i nivell de protecció entre bicicletes i vehicles motoritzats, la maniobra d'avançament és la interacció més freqüent i perillosa que es produeix entre ells. Per tant, la presència de ciclistes en carreteres convencionals pot afectar tant des del punt de vista de la seguretat viària com de la funcionalitat del trànsit.

El principal objectiu d'aquesta investigació és la caracterització del trànsit ciclista i la seva interacció amb els vehicles a motor, especialment en maniobres de seguiment i avançament, a partir d'observacions naturalístiques del fenomen, mitjançant l'ús de bicicletes instrumentades i d'observacions puntuals en trams d'estudi prèviament seleccionats. L'estudi s'ha realitzat considerant ciclistes circulant individualment i en grup per trams de carreteres convencionals amb diferents característiques, tant geomètriques com de trànsit. S'han analitzat en detall 2,135 maniobres d'avançament a ciclistes. La durada de l'avançament s'ha considerat un factor clau pel que fa al seu efecte en la seguretat i en la funcionalitat del trànsit. En conseqüència, aquesta variable s'ha analitzat amb especial interès, desenvolupant un model predictiu de la durada de l'avançament considerant factors relatius a la configuració dels grups de ciclistes, a la carretera i a la pròpia maniobra d'avançament.

A partir de les observacions s'ha adaptat, calibrat i validat un model de microsimulació del trànsit que incorpora el trànsit ciclista en carreteres convencionals i la seva interacció amb els vehicles motoritzats. Mitjançant les observacions i l'ús de el model de microsimulació s'han obtingut mesures d'acompliment que permeten caracteritzar la influència de la presència de ciclistes en la funcionalitat del trànsit, mostrant una reducció de la funcionalitat del trànsit a l'augmentar el trànsit ciclista. Les mesures d'acompliment relacionades amb el nombre d'avançaments i la demora són les més sensibles a la presència de ciclistes, seguides de les mesures relacionades amb el seguiment entre usuaris. Les carreteres amb seccions més estretes són més sensibles a la presència de ciclistes, i en elles la configuració dels grups en paral·lel millora lleugerament la funcionalitat del trànsit al facilitar els avançaments. Els resultats d'aquesta investigació permeten una millor comprensió del fenomen alhora que es tradueixen en recomanacions per a la millora del disseny i/o l'exploració de carreteres convencionals amb presència ciclista. Així mateix, s'han desenvolupat eines específiques com el model predictiu i el model de microsimulació que poden ser utilitzats pels gestors d'infraestructures per analitzar altres carreteres i proporcionar una integració més segura i operativa dels diferents usuaris de les mateixes.

Abstract

Analysis of traffic operation of two-lane rural roads with cyclist presence

Nowadays, the presence of sport cyclists on two-lane rural roads is a common phenomenon. Cyclists ride individually and in groups, sharing the road with motorized vehicles and interacting with them. Due to the differences in speed, volume and level of protection between bicycles and motorized vehicles, the overtaking manoeuvre is the most frequent and dangerous interaction that occurs between them. Therefore, the presence of cyclists on two-lane rural roads can affect both road safety and traffic operation.

The main objective of this research is the characterization of cycle traffic and its interaction with motorized vehicles, especially in follow-up and overtaking manoeuvres, based on naturalistic observations of the phenomenon, using instrumented bicycles and observations at the extremes of the study sections. The study has been carried out considering cyclists who circulate individually and in groups on sections of two-lane rural roads with different characteristics, both geometric and traffic. A total of 2,135 overtaking manoeuvres to cyclists have been analysed in detail. The duration of overtaking has been considered a key factor in terms of its effect on safety and traffic operation. Consequently, this variable has been analysed with special interest, developing a predictive model of the overtaking duration, considering factors related to the configuration of groups of cyclists, the road and the overtaking manoeuvre itself.

Based on the observations, a traffic microsimulation model that incorporates cycle traffic on two-lane rural roads and its interaction with motorized vehicles has been adapted, calibrated and validated. Through observations and the use of the microsimulation model, performance measures have been obtained that allow characterizing the influence of the presence of cyclists on traffic operation, showing a reduction in traffic operation as cycle traffic increases. Performance measures related to the number of overtaking manoeuvres and delay are the most sensitive to the presence of cyclists, followed by measures related to users platooning. Roads with narrow cross-sections are more sensitive to the presence of cyclists, and on them the two-abreast configuration of groups of cyclists slightly improves traffic operation by facilitating overtaking. The results of this research allow a better understanding of the phenomenon as well as being translated into recommendations for improving the design and/or operation of two-lane rural roads with a cyclist presence. In addition, specific tools have been developed such as the predictive model and the microsimulation model which can be used by infrastructure managers to analyse other rural roads and provide a safer and more operational integration of the different road users.

Tabla de Contenido

Resumen	I
Resum	III
Abstract	V
Tabla de Contenido	VII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XVII
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Introducción	1
1.3 Estructura del documento	3
Capítulo 2 Estado del Arte	5
2.1 Presencia ciclista en carretera y siniestralidad asociada	5
2.1.1 Caracterización de la demanda ciclista en carreteras convencionales	6
2.1.2 Siniestralidad ciclista en carreteras convencionales	10
2.2 Actuaciones de las Administraciones Públicas relacionadas con el ciclismo	13
2.2.1 Regulación legal	15
2.2.2 Actuaciones específicas en la Comunitat Valenciana enfocadas al ciclismo de carretera	19
2.3 Estudios de interacciones entre vehículos motorizados y bicicletas	20
2.3.1 Metodologías utilizadas para la obtención de datos	20
2.3.1.1 Cámaras fijas	20
2.3.1.2 Vehículo instrumentado	21
2.3.1.3 Bicicleta instrumentada	22
2.3.1.4 Encuestas sobre comportamiento y percepción	28
2.3.1.5 Microsimulación del tráfico	29
2.3.1.6 Simulador de conducción	31
2.3.1.7 Realidad virtual	33
2.3.1.8 Pruebas en circuito cerrado	33
2.3.2 Variables analizadas	34
2.4 Microsimulación del tráfico	35
2.4.1 Modelos de microsimulación del tráfico existentes	35
2.4.2 Microsimulador de tráfico Aimsun Next	37
2.4.2.1 Módulo de adelantamiento en carreteras convencionales	38
2.5 Análisis de la funcionalidad del tráfico	42
2.5.1 Nivel de servicio para el tráfico ciclista	43
2.5.2 Nivel de servicio para el tráfico motorizado	45
2.5.2.1 Highway Capacity Manual versión 6.0	45
2.5.2.2 Highway Capacity Manual versión 6.1 (pre-publication)	47

2.6	Conclusiones del estado del arte	49
Capítulo 3 Objetivos, hipótesis y alcance		51
Capítulo 4 Materiales y métodos		55
4.1	Metodología para el análisis de la maniobra de adelantamiento	56
4.1.1	Diseño experimental: datos de maniobra de adelantamiento	56
4.1.1.1	Instrumentación de las bicicletas	56
4.1.1.2	Configuraciones de los grupos de ciclistas	58
4.1.1.3	Condicionantes y limitaciones de las tomas de datos	60
4.1.2	Ejecución experimental	61
4.1.2.1	Selección de los tramos de estudio	61
4.1.2.2	Calendario de toma de datos	65
4.1.2.3	Desarrollo de las tomas de datos	66
4.1.3	Reducción de datos	68
4.1.4	Modelo de duración del adelantamiento	72
4.2	Metodología para el análisis de la funcionalidad del tráfico	76
4.2.1	Diseño experimental: tomas de datos en inicio y fin de tramo	76
4.2.1.1	Equipo empleado	77
4.2.1.2	Condicionantes y limitaciones de las tomas de datos	77
4.2.2	Ejecución experimental	77
4.2.2.1	Selección de los tramos de estudio	78
4.2.2.2	Calendario de las tomas de datos	80
4.2.2.3	Desarrollo de las tomas de datos	81
4.2.3	Reducción de datos	81
4.2.4	Modelo de microsimulación del tráfico	83
4.2.4.1	Adaptación del modelo de microsimulación del tráfico en Aimsun Next	84
4.2.4.2	Calibración y validación del modelo de microsimulación del tráfico	87
4.2.5	Análisis de la funcionalidad del tráfico	89
4.2.5.1	Medidas de desempeño	89
4.2.5.2	Diseño de escenarios de tráfico	91
Capítulo 5 Análisis de resultados		93
5.1	Análisis de la maniobra de adelantamiento a ciclistas	93
5.1.1	Caracterización de la maniobra de adelantamiento	93
5.1.1.1	Tamaño muestral de adelantamientos registrados por carretera y configuración del grupo de ciclistas	95
5.1.1.2	Tipo de vehículo adelantante	96
5.1.1.3	Tipo de maniobra de adelantamiento	97
5.1.1.4	Tipo de línea de separación de sentidos	98
5.1.1.5	Visibilidad del vehículo opuesto	99
5.1.1.6	Invasión del carril opuesto durante la maniobra	100
5.1.1.7	Alineación en planta	101
5.1.1.8	Velocidad del vehículo adelantante durante la maniobra	102
5.1.1.9	Separación lateral durante el adelantamiento	103
5.1.1.10	Duración de la maniobra de adelantamiento	105
5.1.2	Modelización de la duración del adelantamiento a ciclistas	106
5.1.2.1	Análisis descriptivo de datos observados	106

5.1.2.2	Modelos de duración del adelantamiento	108
5.2	Análisis de la funcionalidad del tráfico	116
5.2.1	Análisis de la funcionalidad del tráfico a partir de observaciones	116
5.2.1.1	Tramo de estudio en la CV-502	116
5.2.1.2	Tramo de estudio en la CV-310	121
5.2.1.3	Resumen de las tomas de datos en los extremos del tramo de estudio	126
5.2.2	Estudio de microsimulación	127
5.2.2.1	Tramo de la carretera CV-502	128
5.2.2.2	Tramo de la carretera CV-310	136
5.2.3	Análisis de la funcionalidad del tráfico a partir del uso de modelos de microsimulación del tráfico	146
5.2.3.1	Simulaciones de los escenarios de tráfico observados	146
5.2.3.2	Simulaciones de nuevos escenarios de tráfico	154
5.3	Aplicaciones del modelo de microsimulación para la gestión de la infraestructura	169
5.3.1	Configuración de los grupos de ciclistas	169
5.3.1.1	Tramo de la CV-502	169
5.3.1.2	Tramo de la CV-310	174
5.3.1.3	Resumen del análisis de la configuración de los grupos de ciclistas	178
5.3.2	Tamaño del grupo de ciclistas	179
5.3.3	Velocidad máxima de adelantamiento a ciclistas	183
5.3.3.1	Análisis de los datos observados	183
5.3.3.2	Simulación en Aimsun Next	185
5.3.3.3	Resumen del análisis de la variación de la velocidad límite durante el adelantamiento	191
5.3.4	Velocidad límite del tramo de carretera	192
Capítulo 6 Discusión		197
6.1	Maniobra de adelantamiento a ciclistas	197
6.1.1	Caracterización de la maniobra de adelantamiento	197
6.1.2	Modelo de duración del adelantamiento a ciclistas	199
6.2	Funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas	202
6.2.1	Datos en extremos del tramo de estudio	203
6.2.2	Modelo de microsimulación del tráfico	204
6.2.3	Sensibilidad de las medidas de desempeño a variaciones en el tráfico ciclista	205
6.2.4	Configuración de los grupos de ciclistas	210
6.2.5	Gestión de la velocidad límite de la carretera	211
6.3	Balance del contraste de hipótesis	212
Capítulo 7 Conclusiones		215
7.1	Conclusiones	215
7.2	Recomendaciones y propuestas de mejora	221
7.3	Futuras líneas de investigación	222
Agradecimientos		225
Referencias bibliográficas		227

Conclusión	233
Anexo A	234
A.1 Publicaciones en revistas indexadas	234
A.2 Participaciones en congresos internacionales	234
A.3 Participaciones en congresos nacionales	235
Anexo B	237
Chapter 1 Introduction	239
Chapter 3 Objectives, hypotheses and scope	243
Chapter 7 Conclusions and recommendations	247

Lista de figuras

<i>Figura 1. Evolución del número de licencias federativas de ciclistas en el periodo 2008-2020 (Ministerio de Cultura y Deporte, 2021).</i>	7
<i>Figura 2. Hora de inicio de registros de recorridos ciclistas en Strava en enero y septiembre de 2019 y 2020 en España (Strava, 2020).</i>	8
<i>Figura 3. Representación de la distribución horaria y diaria de la demanda ciclista en un segmento de carretera (Córdoba Baviera, 2019).</i>	9
<i>Figura 4. Cambio promedio anual en las muertes de ciclistas en comparación con el cambio promedio anual en las muertes de usuarios motorizados de la vía pública registrados durante el período 2010-2018 (European Transport Safety Council, 2020).</i>	11
<i>Figura 5. Evolución de los fallecidos y heridos hospitalizados en bicicletas en vías interurbanas y urbanas en España (2010-2019) (Dirección General de Tráfico, 2019a).</i>	12
<i>Figura 6. Mapa de accidentes de bicicletas 2012-2016 correspondiente a la zona centro (Generalitat Valenciana, 2020a).</i>	12
<i>Figura 7. Señal dinámica incorporada a las carreteras de La Rioja en 2017 (izquierda) y de Pontevedra en 2018 (derecha) (Revista DGT).</i>	14
<i>Figura 8. Fases del adelantamiento a ciclistas y distancias al ciclista consideradas por Kovaceva et al. (2019).</i>	22
<i>Figura 9. Fases de la maniobra de adelantamiento identificadas por Dozza et al. (2016).</i>	24
<i>Figura 10. Bicicleta instrumentada utilizada por Llorca et al. (2017).</i>	25
<i>Figura 11. Riesgo subjetivo percibido por los ciclistas según separación lateral, velocidad del adelantante y fuerza aerodinámica durante los adelantamientos (García et al., 2020).</i>	26
<i>Figura 12. Secciones transversales simuladas por Bella and Silvestri (2017).</i>	31
<i>Figura 13. Experimento en circuito cerrado realizado por Rasch et al. (2020).</i>	34
<i>Figura 14. Simulación de bicicletas considerando el modelo no basado en carriles en Aimsun Next 20 (Aimsun, 2021).</i>	37
<i>Figura 15. Evolución de Aimsun Next (Aimsun, 2021).</i>	38
<i>Figura 16. Deseo de adelantar y principales parámetros de los que depende (Llorca et al., 2015).</i>	40
<i>Figura 17. Diagrama de flujo del modelo de adelantamiento en carreteras convencionales (Llorca et al., 2015).</i>	42
<i>Figura 18. Variables incluidas en la definición del nivel de servicio de bicicletas adoptado por Kazemzadeh et al. (2020).</i>	44
<i>Figura 19. Cámaras Virb Elite de Garmin utilizadas en las tomas de datos.</i>	56
<i>Figura 20. Módulos del velocímetro láser TruSense T100/T200.</i>	57
<i>Figura 21. Bicicleta totalmente instrumentada.</i>	57
<i>Figura 22. Configuraciones de los grupos de ciclistas utilizadas en las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.</i>	59
<i>Figura 23. Ejemplo de rutas ciclistas en el entorno de Valencia del mapa de calor de Strava.</i>	61
<i>Figura 24. Localización de los tramos de estudio de las bicicletas instrumentadas.</i>	62
<i>Figura 25. Sección transversal del tramo de carretera CV-500 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.</i>	63
<i>Figura 26. Sección transversal del tramo de carretera CV-502 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.</i>	64
<i>Figura 27. Sección transversal del tramo de carretera CV-310 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.</i>	64

Figura 28. Sección transversal del tramo de carretera CV-333 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.	65
Figura 29. Sección transversal del tramo de carretera CV-50 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.	65
Figura 30. Ciclistas recorriendo los tramos con las bicicletas instrumentadas.	67
Figura 31. Captura del software VIRB Edit de Garmin durante el proceso de reducción de datos.	68
Figura 32. Esquema de las separaciones de referencia en la maniobra de adelantamiento.	69
Figura 33. Línea temporal de la maniobra de adelantamiento a ciclistas. Se representan las cuatro fases de la maniobra: 1) aproximación, 2) inicio, 3) adelantamiento, 4) retorno.	70
Figura 34. Disposición de las cámaras en las grabaciones en los extremos de los tramos de estudio.	77
Figura 35. Localización del tramo de la CV-502 seleccionado inicialmente para las tomas de datos en los extremos del tramo.	78
Figura 36. Localización y características del tramo de estudio de la CV-502 para datos en extremos del tramo.	79
Figura 37. Localización del tramo de la CV-310 seleccionado inicialmente para las tomas de datos en los extremos del tramo.	79
Figura 38. Localización y características del tramo de estudio de la CV-310 para datos en extremos del tramo.	80
Figura 39. Visionado de un vídeo correspondiente a la salida del tramo de carretera mediante el programa Kinovea.	81
Figura 40. Parámetro de Aimsun Next 20 que permite el adelantamiento incluso en línea continua.	84
Figura 41. Parámetros relativos a un usuario en Aimsun Next.	85
Figura 42. Tramo de generación de cola anterior a la entrada del tramo de estudio.	86
Figura 43. Adelantamiento a un grupo de ciclistas en el software Aimsun Next 20.	87
Figura 44. Adelantamientos registrados por tramo de estudio y configuración del grupo de ciclistas.	94
Figura 45. Distribuciones de la velocidad del adelantante (km/h), separación lateral (m) y duración del adelantamiento (s) según tipo de vehículo adelantante.	97
Figura 46. Porcentaje de adelantamientos registrados según tipo de maniobra para cada tramo de estudio.	98
Figura 47. Porcentaje de adelantamientos registrados según tipo de maniobra para cada configuración del grupo de ciclistas.	98
Figura 48. Porcentaje de adelantamientos registrados según línea central para cada tramo de estudio.	99
Figura 49. Porcentaje de adelantamientos registrados según tipo de línea central para cada configuración del grupo de ciclistas.	99
Figura 50. Porcentaje de Adelantamientos registrados según visibilidad del opuesto para cada tramo de estudio.	100
Figura 51. Porcentaje de Adelantamientos registrados según visibilidad del opuesto para cada configuración del grupo de ciclistas.	100
Figura 52. Porcentaje de adelantamientos registrados según invasión del carril opuesto para cada tramo de estudio.	101
Figura 53. Porcentaje de Adelantamientos registrados según invasión del carril opuesto para cada configuración del grupo de ciclistas.	101

<i>Figura 54. Porcentajes de adelantamientos registrados según alineación en planta para cada tramo de estudio.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 55. Porcentajes de adelantamientos registrados según alineación en planta para cada configuración del grupo de ciclistas.</i>	<i>102</i>
<i>Figura 56. Distribución de velocidades del adelantante registradas para cada tramo de estudio.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 57. Datos de velocidades del adelantante registradas según configuración del grupo de ciclistas.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 58. Distribución de separaciones laterales registradas para cada tramo de estudio. ...</i>	<i>104</i>
<i>Figura 59. Datos estadísticos de separaciones laterales registradas según configuración del grupo de ciclistas.</i>	<i>104</i>
<i>Figura 60. Porcentaje de no cumplimiento de la separación mínima de 1.5 m por configuración del grupo de ciclistas.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 61. Duración media del adelantamiento e intervalos LSD de Fisher por configuración del grupo de ciclistas (izda) y por tramo de estudio (dcha).</i>	<i>105</i>
<i>Figura 62. Distribución de las duraciones del adelantamiento (s) registradas para cada tipo de maniobra de adelantamiento.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 63. Gráficos de densidad y de trazas para cada parámetro para el modelo de duración del adelantamiento de maniobras lanzadas (M7F).</i>	<i>110</i>
<i>Figura 64. Gráficos de densidad y de trazas para cada parámetro para el modelo de duración del adelantamiento de maniobras en seguimiento (M7A).</i>	<i>111</i>
<i>Figura 65. Efectos condicionales de cada variable sobre la duración del adelantamiento para maniobras lanzadas y en seguimiento. El resto de variables se mantienen en el valor de referencia en el caso de variables categóricas y en la media para variables numéricas.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 66. Efecto condicional del ancho de la semiplataforma sobre la duración del adelantamiento en el modelo M7FN.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 67. Bicicletas acumuladas registradas durante la toma de datos en la CV-502.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 68. Vehículos motorizados acumulados registrados durante la toma de datos en la CV-502.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 69. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido decreciente en la CV-502.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 70. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido creciente en la CV-502.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 71. Intensidad horaria equivalente de motorizados en sentido decreciente en la CV-502.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 72. Grupos de ciclistas y número de ciclistas que forman el grupo registrados en la CV-502.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 73. Velocidades medias de recorrido de los usuarios en sentido decreciente en la CV-502.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 74. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de bicicletas adelantadas en la CV-502.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 75. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de grupos de bicicletas adelantados en la CV-502.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 76. Bicicletas acumuladas durante la toma de datos en los dos sentidos en la CV-310.</i>	<i>121</i>
<i>Figura 77. Vehículos ligeros acumulados en los dos sentidos en la CV-310.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 78. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido decreciente en la CV-310.</i>	<i>122</i>
<i>Figura 79. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido creciente en la CV-310.</i>	<i>123</i>
<i>Figura 80. Intensidades horarias equivalentes vehículos ligeros en los dos sentidos en la CV-310.</i>	<i>123</i>

Figura 81. Grupos de ciclistas y número de ciclistas que forman el grupo registrados en la CV-310.....	124
Figura 82. Porcentaje de configuración en línea o paralelo en sentido decreciente en la CV-310.	124
Figura 83. Distribución de velocidades de las bicicletas en los dos sentidos en la CV-310.	125
Figura 84. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de bicicletas adelantadas en la CV-310.....	125
Figura 85. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de grupos de bicicletas adelantados en la CV-310.....	126
Figura 86. Intensidades horarias equivalentes de usuarios en sentido decreciente calculadas para la CV-502.....	130
Figura 87. Distribuciones de la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros observada y simulada para los escenarios de calibración en la CV-502.	133
Figura 88. Distribuciones del intervalo de tiempo entre usuarios observado y simulado en la entrada y salida del tramo de estudio para los escenarios de calibración en la CV-502.	134
Figura 89. Intensidades horarias equivalentes de usuarios en sentido decreciente calculadas para la CV-310.....	139
Figura 90. Distribuciones de la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros observada y simulada para los escenarios de calibración en la CV-310.	142
Figura 91. Distribuciones del intervalo de tiempo entre usuarios observado y simulado en la entrada y salida del tramo de estudio para los escenarios de calibración en la CV-310.	143
Figura 92. Distribuciones de las duraciones del adelantamiento (s) a los diferentes grupos de ciclistas obtenidas en campo en la CV-502.	147
Figura 93. Distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros (km/h) (izquierda), y medianas e intervalos del 95% de confianza (derecha) obtenidas en las simulaciones de los escenarios observados en la CV-502.	148
Figura 94. Distribuciones de los adelantamientos realizados por vehículo (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-502.....	149
Figura 95. Distribuciones de las demoras acumuladas (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-502.	150
Figura 96. Distribuciones de las duraciones del adelantamiento (s) a los diferentes grupos de ciclistas obtenidas en campo en la CV-310. (homogeneizar).....	151
Figura 97. Distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros (km/h) (izquierda), y medianas e intervalos del 95% de confianza (derecha) obtenidas en las simulaciones de los escenarios observados de la CV-310.	152
Figura 98. Distribuciones de los adelantamientos realizados por vehículo (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-310.....	153
Figura 99. Distribuciones de las demoras acumuladas (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-310.	153
Figura 100. Velocidad media de recorrido de vehículos ligeros (km/h) resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310. La disposición de los grupos de ciclistas es P (paralelo), L (línea), mientras que los escenarios de tráfico motorizados corresponden con M1, M2 y M3.	158

<i>Figura 101. Tiempo de demora de vehículos ligeros (s/veh) resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.</i>	<i>160</i>
<i>Figura 102. Porcentaje del tiempo de demora entre el tiempo de recorrido del tramo de los vehículos ligeros cuando no circulan ciclistas resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.</i>	<i>161</i>
<i>Figura 103. Porcentaje del tiempo de demora entre el tiempo de recorrido del tramo de los vehículos ligeros resultados de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 104. Adelantamientos realizados por vehículo ligero resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.</i>	<i>163</i>
<i>Figura 105. Porcentaje de usuarios en cola a la salida del tramo ligero resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 106. Porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo ligero resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.....</i>	<i>166</i>
<i>Figura 107. Densidad de seguidores a la salida del tramo considerando sólo a los vehículos motorizados resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.</i>	<i>167</i>
<i>Figura 108. Medias e intervalos LSD de Fisher para las medidas de desempeño según los tres escenarios de tráfico simulados para la CV-502.</i>	<i>169</i>
<i>Figura 109. Medias e intervalos LSD de Fisher para las medidas de desempeño según los tres escenarios de tráfico simulados para la CV-310.</i>	<i>174</i>
<i>Figura 110. Relación entre la duración del adelantamiento y velocidad del adelantante considerando los datos recogidos en campo relativos a adelantamientos realizados por vehículos ligeros.</i>	<i>184</i>
<i>Figura 111. Duraciones medias del adelantamiento e intervalos de velocidades del adelantante según la configuración del grupo de ciclistas.....</i>	<i>184</i>
<i>Figura 112. Separaciones laterales medias e intervalos de velocidades del adelantante según la configuración del grupo de ciclistas.</i>	<i>185</i>
<i>Figura 113. Parámetros considerados en el escenario con velocidad límite igual a la observada en el tramo.</i>	<i>186</i>
<i>Figura 114. Parámetros considerados en el escenario con velocidad de adelantamiento reducida en 20 km/h en relación a la velocidad límite del tramo.</i>	<i>186</i>
<i>Figura 115. Trayectorias y velocidades de recorrido del tramo del vehículo 1 en los dos escenarios simulados.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 116. Trayectorias y velocidades de recorrido del tramo del vehículo 2 en los dos escenarios simulados.....</i>	<i>190</i>
<i>Figura 117. Trayectorias y velocidades de recorrido del tramo del vehículo 1 en los dos escenarios simulados.....</i>	<i>191</i>

Lista de tablas

<i>Tabla 1. Parámetros del modelo de adelantamiento en carretera convencional de Aimsun Next (Aimsun, 2021).</i>	39
<i>Tabla 2. Nivel de servicio de bicicletas en carreteras convencionales (Transportation Research Board, 2016).</i>	44
<i>Tabla 3. Nivel de servicio para vehículos motorizados en carreteras convencionales (Transportation Research Board, 2016).</i>	46
<i>Tabla 4. Valores del nivel de servicio de un tramo de carretera convencional según la velocidad límite del tramo (km/h) y la densidad de seguidores en la salida del tramo (seguidores/km/carril).</i>	49
<i>Tabla 5. Resultados de las observaciones naturalísticas para el análisis de la circulación de grupos de ciclistas.</i>	58
<i>Tabla 6. Calendario de tomas de datos realizadas con las bicicletas instrumentadas.</i>	66
<i>Tabla 7. Variables de estudio obtenidas a partir de las bicicletas instrumentadas y valores. *Estas variables se obtienen al inicio y al final de la maniobra de adelantamiento.</i>	70
<i>Tabla 8. Variables utilizadas en el modelo de duración del adelantamiento.</i>	72
<i>Tabla 9. Diseño de modelos de duración del adelantamiento considerando diferentes factores y distribuciones de respuesta. Distribución funcional: 1) log-normal; 2) Weibull; 3) exponencial.</i> 74	
<i>Tabla 10. Calendario de toma de datos en los extremos de los tramos de estudio.</i>	80
<i>Tabla 11. Parámetros del modelo de microsimulación a calibrar en Aimsun Next 20.</i>	88
<i>Tabla 12. Número de interacciones registradas en las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.</i>	94
<i>Tabla 13. Error obtenido relativo a la velocidad del adelantante (km/h) y a la separación lateral (m) con el tamaño de la muestra para los diferentes tramos de estudio considerando cada configuración del grupo de ciclistas.</i>	96
<i>Tabla 14. Velocidades medias del vehículo adelantante registradas y velocidad límite para cada tramo de estudio.</i>	103
<i>Tabla 15. Separaciones laterales medias registradas y ancho de la semiplataforma para cada tramo de estudio.</i>	104
<i>Tabla 16. Porcentaje de no cumplimiento de la separación mínima por tramo de estudio.</i>	105
<i>Tabla 17. Resultados de la duración del adelantamiento a partir de observaciones en campo para maniobras lanzadas y en seguimiento.</i>	107
<i>Tabla 18. Diseño de modelos previos para la duración del adelantamiento en maniobras lanzadas y en seguimiento según factores considerados. Distribución funcional: 1 lognormal; 2 Weibull. Resultados de la LOOCV aplicada a estos modelos previos.</i>	108
<i>Tabla 19. Resultados del leave-one-out-cross-validation (LOOCV) para los ocho modelos ajustados de las maniobras lanzadas.</i>	109
<i>Tabla 20. Resultados del leave-one-out-cross-validation (LOOCV) para los ocho modelos ajustados de las maniobras en seguimiento.</i>	109
<i>Tabla 21. Resultados de la comparación de modelos Bayesianos utilizando la leave-one-out-cross-validation (LOOCV). M7F y M6A fueron utilizados como base para las comparaciones.</i> 109	
<i>Tabla 22. Resultados de cada iteración de validación mediante el método de 10-fold-cross validation para los dos modelos seleccionados.</i>	109
<i>Tabla 23. Distribución de los parámetros del modelo de duración del adelantamiento para maniobras lanzadas. Media, SE y valores mínimos y máximos del intervalo de credibilidad del 95% para cada parámetro. σ es el parámetro de la distribución log-normal.</i>	111

Tabla 24. Distribución de los parámetros del modelo de duración del adelantamiento para maniobras en seguimiento. Media, SE y valores mínimos y máximos del intervalo de credibilidad del 95% para cada parámetro. σ es el parámetro de la distribución log-normal.	112
Tabla 25. Valores estadísticos de la duración del adelantamiento (s) según tipo de maniobra y ancho de la semiplataforma (M) a partir de los datos observados.	114
Tabla 26. Límites de velocidad en el tramo de la CV-502.	128
Tabla 27. Líneas centrales de separación de sentidos existentes en el tramo de la CV-502.	128
Tabla 28. Número de adelantamientos registrados y datos de velocidad del adelantante, separación lateral y duración del adelantamiento según configuración del grupo de ciclistas adelantado.	129
Tabla 29. Escenarios de tráfico (usuarios/h) utilizados para la calibración y la validación del tramo de la CV-502.	131
Tabla 30. Valores de los principales parámetros del modelo de microsimulación de tráfico calibrados para la CV-502.	132
Tabla 31. Resultados estadísticos de las duraciones de los adelantamientos (s) observadas y simuladas para cada escenario de calibración según la configuración del grupo de ciclistas para la CV-502.	132
Tabla 32. Resultados estadísticos de las duraciones de los adelantamientos (s) observadas y simuladas según la configuración del grupo de ciclistas para la CV-502.	133
Tabla 33. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de calibración de la CV-502.	134
Tabla 34. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de calibración de la CV-502.	134
Tabla 35. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de calibración en la entrada y salida del tramo de la CV-502.	135
Tabla 36. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de validación de la CV-502.	135
Tabla 37. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de validación de la CV-502.	136
Tabla 38. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado en la entrada y salida del tramo y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de validación de la CV-502.	136
Tabla 39. Límites de velocidad en el tramo de la CV-310.	137
Tabla 40. Líneas centrales de separación de sentidos existentes en el tramo de la CV-310.	137
Tabla 41. Maniobras de adelantamiento registradas con las bicicletas instrumentadas y valores de las principales variables para la CV-310.	138
Tabla 42. Escenarios de tráfico utilizados para calibración y validación (usuarios/h) para la CV-310.	139
Tabla 43. Ancho de los elementos utilizados en el modelo de microsimulación del tráfico de la CV-310 en Aimsun Next.	140
Tabla 44. Valores de los principales parámetros del modelo de microsimulación de tráfico calibrados para la CV-310.	141
Tabla 45. Resultados estadísticos de las duraciones de los adelantamientos (s) simuladas según la configuración del grupo de ciclistas para la CV-310.	141

<i>Tabla 46. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de calibración de la CV-310.</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 47. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de calibración de la CV-310.</i>	<i>143</i>
<i>Tabla 48. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de calibración en la entrada y salida del tramo de la CV-310.</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 49. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de validación de la CV-310.</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 50. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de validación de la CV-310.</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 51. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado en la entrada y salida del tramo y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de validación de la CV-310.</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 52. Resultados estadísticos de las simulaciones para el porcentaje de vehículos en cola (%VC) en los escenarios observados de la CV-502.</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 53. Resultados estadísticos de las simulaciones para el porcentaje de vehículos en cola (%VC) en los escenarios observados de la CV-310.</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 54. Diseño de escenarios de tráfico de vehículos motorizados (usuarios/h) para la CV-502.</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 55. Diseño de escenarios de tráfico de grupos de ciclistas basado en el escenario de demanda máxima ciclista observada (usuarios/h) para la CV-502.</i>	<i>156</i>
<i>Tabla 56. Diseño de escenarios de tráfico de vehículos motorizados (usuarios/h) para la CV-310.</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 57. Diseño de escenarios de tráfico de grupos de ciclistas basado en el escenario de demanda máxima ciclista observada (usuarios/h) para la CV-310.</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 58. Valores estadísticos de la velocidad media de recorrido de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.</i>	<i>170</i>
<i>Tabla 59. Valores estadísticos del tiempo de demora de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.</i>	<i>171</i>
<i>Tabla 60. Valores estadísticos del porcentaje del tiempo de demora respecto al tiempo de recorrido del tramo de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.</i>	<i>172</i>
<i>Tabla 61. Valores estadísticos del porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.</i>	<i>172</i>
<i>Tabla 62. Valores estadísticos del número de adelantamientos realizados por vehículo configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.</i>	<i>173</i>
<i>Tabla 63. Valores estadísticos de la densidad de seguidores motorizados en la salida del según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.</i>	<i>173</i>
<i>Tabla 64. Valores estadísticos de la velocidad media de recorrido de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.</i>	<i>175</i>
<i>Tabla 65. Valores estadísticos del tiempo de demora de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.</i>	<i>175</i>

Tabla 66. Valores estadísticos del porcentaje del tiempo de demora respecto al tiempo de recorrido del tramo de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.	176
Tabla 67. Valores estadísticos del porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.	177
Tabla 68. Valores estadísticos del número de adelantamientos realizados por vehículo configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.	177
Tabla 69. Valores estadísticos de la densidad de seguidores motorizados en la salida del según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.	178
Tabla 70. Escenarios de tráfico ciclista según tamaño del grupo (ciclistas/h).	179
Tabla 71. Medidas de desempeño calculadas para el nivel de demanda ciclista baja (60 ciclistas/h) según el tamaño del grupo de ciclistas.	180
Tabla 72. Medidas de desempeño calculadas para el nivel de demanda ciclista media (200 ciclistas/h) según el tamaño del grupo de ciclistas.	181
Tabla 73. Medidas de desempeño calculadas para el nivel de demanda ciclista alta (600 ciclistas/h) según el tamaño del grupo de ciclistas.	182
Tabla 74. Escenario de tráfico simulado (usuarios/hora) para el análisis de la reducción de velocidad de adelantamiento.	187
Tabla 75. Medidas de desempeño a nivel macroscópico considerando los escenarios con velocidad de adelantamiento igual a la límite y reducción de 20km/h.	187
Tabla 76. Duraciones medias del adelantamiento(s) a los diferentes grupos de ciclistas considerando los dos escenarios, y variación entre el escenario 1 y el 2.	188
Tabla 77. Escenarios de reducción de la velocidad límite del tramo de carretera.	193
Tabla 78. Medidas de desempeño a nivel macroscópico considerando los escenarios con velocidad límite del tramo de 70, 60 y 50 km/h, y variación entre los escenarios.	193
Tabla 79. 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.	194
Tabla 80. Tasa de variación porcentual de cada medida de desempeño respecto a variaciones en la demanda ciclista para los tres niveles de tráfico motorizado en el tramo de la CV-502.	206
Tabla 81. Tasa de variación porcentual de cada medida de desempeño respecto a variaciones en la demanda ciclista para los tres niveles de tráfico motorizado en el tramo de la CV-310.	208

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

En la presente tesis doctoral se ha desarrollado una investigación con el fin de determinar cómo afecta a la funcionalidad del tráfico la presencia de ciclistas en carreteras convencionales. Para ello se han desarrollado y llevado a cabo dos metodologías de tomas de datos en campo que han permitido modelar el fenómeno y analizarlo para obtener los resultados y las conclusiones presentadas en este documento.

La tesis ha sido dirigida por el Catedrático de Universidad, Prof. Dr. Alfredo García García, y por la Profesora Contratada Doctora, Prof. Dr. Griselda López Maldonado, ambos de la Universitat Politècnica de València (UPV).

Esta tesis doctoral ha sido realizada gracias a un contrato predoctoral con la Universitat Politècnica de València desarrollado en el Instituto del Transporte y Territorio. Este contrato está vinculado a una “Ayuda para contratos predoctorales para la formación de doctores” de la Agencia Estatal de Investigación con referencia BES-2017-080474, ligada al proyecto de investigación con referencia TRA2016-80897-R “Mejora de la seguridad y operación de carreteras convencionales con ciclistas (Bike2lane)”. La presente tesis abarca una parte de este proyecto de investigación, concretamente se centra en el análisis de la influencia del tráfico ciclista en la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales y en la modelización del fenómeno. La doctoranda ha colaborado activamente en el desarrollo de todo el proyecto Bike2lane, llevado a cabo por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) de la UPV.

Durante el desarrollo de la tesis, la doctoranda realizó una estancia de investigación en la Crash Analysis and Prevention Unit de la Chalmers University of Technology de Göteborg (Sweden). Esta estancia se llevó a cabo entre enero y abril de 2021, bajo la supervisión del Dr. Marco Dozza. La duración de esta estancia fue de tres meses, y junto con la redacción de parte de la tesis en inglés, se cumple con los requisitos para optar a la mención de Doctor Internacional.

1.2 Introducción

En las carreteras convencionales españolas ha aumentado considerablemente la circulación de ciclistas en los últimos años. Estos ciclistas utilizan las carreteras interurbanas mayoritariamente para realizar ciclismo con fines recreativos y deportivos, prueba de ello es el aumento de las licencias deportivas de ciclistas federados que ha ascendido en 2020 a 75,638 licencias federativas, habiendo un total de 3,634 clubs deportivos ciclistas federados (Ministerio de Cultura y Deporte, 2021). De hecho, el ciclismo es el segundo deporte más practicado en España, disponiendo de bicicletas un 49.8% de los hogares (Ministerio Cultura y Deporte, 2021). En la Comunitat Valenciana, debido a las buenas condiciones climáticas y orográficas que ofrece, la práctica del ciclismo de carretera es habitual, tanto por ciclistas individuales como por grupos de ciclistas.

Sin embargo, la mayoría de las carreteras convencionales han sido diseñadas teniendo en cuenta solamente a los vehículos motorizados, y muchas de ellas carecen de infraestructura específica

para ciclistas, o del espacio que por normativa está destinado para la circulación de ciclistas, como es el arcén de la carretera. Las carreteras convencionales suponen el 90% de la red de carreteras en España (Dirección General de Tráfico, 2019a). En la Diputació de València un 65% de las carreteras convencionales disponen de arcén inexistente o impracticable, presentando un ancho de vía menor de 7 m (Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2019), y muchas de ellas presentan una elevada presencia ciclista. Un estudio realizado por la Universitat de València, a partir de datos de accidentes con ciclistas entre 2008 y 2013 en España facilitados por la Dirección General de Tráfico, concluyó que el 78% de estos accidentes se produjeron en carreteras con arcén inexistente o impracticable (Universitat de València, 2016), demostrando que muchas de las carreteras en las que interaccionan vehículos a motor y bicicletas son secundarias, con arcén estrecho o nulo. En este tipo de carreteras el adelantamiento a ciclistas supone una mayor invasión del sentido opuesto pudiendo crear situaciones de mayor riesgo.

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.

Las bicicletas y los vehículos a motor presentan una notable diferencia en su velocidad de circulación, la cual genera numerosas aproximaciones de los vehículos motorizados a las bicicletas aumentando la necesidad de adelantarlas. Las diferencias que existen entre estos usuarios en términos de volumen y nivel de protección hacen que las maniobras de adelantamiento sean potencialmente peligrosas, pudiendo tener consecuencias sobre la seguridad vial, sobre todo para los ciclistas, que son los usuarios más vulnerables. En 2019 se registraron en España 7,837 accidentes con ciclistas implicados, aunque la mayor parte se produjo en vías urbanas (72%), en vías interurbanas se registró el 60% de las víctimas mortales, falleciendo en este tipo de vía 48 ciclistas, 5 más que en 2018 (Dirección General de Tráfico, 2019a).

La presencia de ciclistas no solamente afecta a la seguridad, sino que también puede afectar a la funcionalidad del tráfico al considerar la interacción entre ciclistas y vehículos motorizados, resultando esta interacción en reducciones de velocidad de los vehículos a motor al encontrarse con las bicicletas. Esta variabilidad de velocidades entre ciclistas y conductores genera necesidades de adelantamiento, ya que los conductores de los vehículos a motor pretenden circular a su velocidad deseada. Por tanto, el adelantamiento tiene un efecto en las condiciones del tráfico, pudiendo mejorar la calidad de la circulación. Sin embargo, la maniobra de adelantamiento a ciclistas ha sido estudiada generalmente desde el punto de vista de la seguridad, y se desconocen estudios previos que hayan analizado la influencia del tráfico ciclista en la funcionalidad del tráfico en carretera. 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.

Uno de los principales objetivos de esta investigación es caracterizar la interacción entre ciclistas y el resto de los usuarios de las carreteras interurbanas, en concreto caracterizar la maniobra de adelantamiento de vehículos motorizados ligeros a bicicletas. Esta maniobra se considera la

interacción más peligrosa entre estos dos usuarios debido, sobre todo, a la diferencia de velocidades que existe entre ellos y a la vulnerabilidad de los ciclistas en cuanto a sistemas de protección. Para poder caracterizar la maniobra de adelantamiento correctamente se debe de recopilar información sobre estudios anteriores, seguidamente se deben de definir las variables de estudio que permitan caracterizar la maniobra, y diseñar una metodología de toma de datos que permita recoger observaciones del mayor número de variables de una manera lo más naturalística posible.

Con todos los datos experimentales se caracterizará el adelantamiento a ciclistas, que servirá de base para implementar un modelo de microsimulación de tráfico con el que poder ampliar el estudio a otras condiciones de tráfico y de la carretera. Se determinarán las medidas de desempeño que mejor caractericen la funcionalidad de una carretera con tráfico ciclista. Estas medidas se basarán en las propuestas por el Manual de Capacidad de Carreteras (Transportation Research Board, 2016), definiendo, si es necesario, nuevas medidas que se adapten a estos usuarios y a sus interacciones.

Finalmente se propondrán medidas y recomendaciones con el fin de mejorar la funcionalidad del tráfico y la seguridad en carreteras convencionales con presencia de ciclistas.

1.3 Estructura del documento

Este documento se ha organizado en 7 capítulos y en 3 anexos. En el **Capítulo 1** se presentan los antecedentes y se expone una introducción a la problemática y la necesidad de estudio.

El **Capítulo 2** se refiere a un estudio del estado del arte en el ámbito en el que se desarrolla la tesis, revisando las publicaciones y conocimientos previos relativos a la presencia de ciclistas y su siniestralidad asociada en carretera, a la normativa existente y al estudio de las interacciones entre ciclistas y vehículos motorizados en carreteras convencionales. También se ha revisado el conocimiento actual sobre modelos de microsimulación de tráfico que incorporan ciclistas y sobre el análisis de la funcionalidad del tráfico.

En el **Capítulo 3** se presentan el objetivo principal y los objetivos específicos de la tesis, así como las principales hipótesis y el alcance de la presente tesis doctoral.

En el **Capítulo 4** se incluye la metodología de la investigación desarrollada, específicamente de las tomas de datos y su reducción; así como la metodología para la adaptación, calibración y validación del modelo de microsimulación del tráfico utilizado. También se describe la ejecución experimental de la metodología descrita.

El **Capítulo 5** muestra los principales resultados obtenidos en esta investigación, así como un análisis de estos. En el **Capítulo 6** se lleva a cabo una discusión de los resultados obtenidos, y junto con estos, se establecen las conclusiones de la tesis, que se presentan en el **Capítulo 7**. Asimismo, en este capítulo se incluyen además las recomendaciones específicas y propuestas de mejora derivadas de las conclusiones de esta tesis y se sugieren futuras líneas de investigación que pueden resultar de gran interés para profundizar en los resultados obtenidos en la tesis.

Durante el desarrollo de la tesis doctoral se han generado un total de 13 aportaciones de resultados presentadas en Congresos, tanto nacionales como internacionales, así como 2 artículos científicos publicados en revistas del ámbito de la investigación. En el Anexo A se detallan estas aportaciones, y se adjuntan particularmente los enlaces a los artículos publicados en revistas científicas. En el Anexo B se incluye el compendio de capítulos traducidos al inglés.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este apartado se realiza una revisión de los estudios y conocimientos desarrollados anteriormente en el ámbito de esta investigación. Primeramente, se realiza una revisión de datos de presencia ciclista en las carreteras convencionales españolas, analizando los datos de siniestralidad ciclista disponibles hasta la fecha en entorno interurbano. Esta revisión ha servido para definir y cuantificar la problemática existente, y que esta investigación pretende ayudar a resolver. Seguidamente, se recopilaron y revisaron los estudios realizados hasta el momento en el ámbito de la circulación de ciclistas en carretera, revisando la normativa correspondiente y los estudios que abarcan las interacciones entre ciclistas y vehículos motorizados. Las metodologías para determinar la funcionalidad del tráfico y las medidas de desempeño utilizadas para su caracterización también fueron asimismo revisadas, así como los modelos de microsimulación del tráfico existentes, y particularmente el utilizado en la presente investigación.

Como conclusión de este apartado se presenta un resumen de las aportaciones más importantes dentro de este ámbito de investigación, y las necesidades y carencias encontradas a partir de la revisión de los estudios realizados.

2.1 Presencia ciclista en carretera y siniestralidad asociada

La presencia de ciclistas en carreteras convencionales es un fenómeno frecuente en la actualidad. La mayoría de los ciclistas que circulan por carretera lo hacen con un fin recreativo y deportivo, utilizando estas vías de manera habitual, debiendo de compartir la infraestructura con los vehículos motorizados.

La red de carreteras en España está formada en un 90% por carreteras convencionales (Dirección General de Tráfico, 2019a), en las que se dispone de un carril para cada sentido de circulación, debiendo los usuarios interaccionar con el tráfico en sentido opuesto sobre todo en la realización de maniobras de adelantamiento. La presencia de usuarios circulando con diferentes velocidades genera la necesidad de realizar maniobras de adelantamiento, siendo necesario disponer de hueco suficiente en el carril opuesto y de suficiente distancia de visibilidad para que un usuario visualice correctamente la presencia de tráfico opuesto para realizar el adelantamiento (Transportation Research Board, 2016). La gran mayoría de carreteras convencionales españolas fueron diseñadas considerando solamente el tráfico motorizado, y muy pocas de ellas disponen de elementos específicos para la circulación de ciclistas, forzando a los ciclistas a compartir el espacio con los vehículos motorizados.

Para realizar estudios en carreteras convencionales por las que circulan ciclistas es necesario cuantificar la demanda ciclista, caracterizando la variación temporal de esta demanda, con el fin de identificar las zonas en las que la demanda ciclista presenta variaciones acusadas y los horarios y días en los que se producen estas posibles variaciones.

Por otra parte, el colectivo ciclista presenta unas características de velocidad de circulación, volumen y nivel de protección muy diferentes al resto de usuarios de las carreteras convencionales, lo que les hace mucho más vulnerables en caso de producirse un accidente

debido a las interacciones que se producen entre los usuarios. Por tanto, para cuantificar el problema que representa la circulación de ciclistas por carreteras convencionales desde el punto de vista de la seguridad vial es imprescindible analizar las principales cifras de siniestralidad ciclista registradas en los últimos años en las carreteras convencionales españolas, así como su evolución.

2.1.1 Caracterización de la demanda ciclista en carreteras convencionales

El aumento del uso de la bicicleta como medio de transporte, y particularmente como herramienta para su uso deportivo en las últimas décadas es un hecho que ha sido demostrado mediante los resultados aportados por diversos estudios y estadísticas relacionadas con el deporte.

La Red de Ciudades por la Bicicleta y la Dirección General de Tráfico realizan cada dos años el estudio titulado Barómetro de la Bicicleta (Red de Ciudades por la Bicicleta, 2019), basado en los hábitos de uso de la bicicleta a nivel nacional obtenidos mediante entrevistas a la población. Este estudio está enfocado en gran parte a los usuarios de bicicleta en ciudad, aunque sus resultados aportan algunos datos aplicables al ciclismo de carretera. En el último Barómetro de la Bicicleta, presentado en 2019, se comprobó que el 89.6% de la población española sabe montar en bicicleta, y que un 50.7% de la población utiliza la bicicleta con alguna frecuencia. Del total de personas que disponen de bicicleta un 14.7% tiene una bicicleta de carretera, siendo este porcentaje un 2.2% mayor que en 2015. Del total de ciclistas que disponen de bicicleta de carretera un 33.9% la utilizan cada día. El Barómetro de la Bicicleta 2019 también revela un ligero aumento del uso de la bicicleta con un fin deportivo, representando este fin un 73.1% de los usuarios que utilizan la bicicleta con alguna frecuencia respecto del 72.3% obtenido en el año 2017.

La encuesta de hábitos deportivos en España presentada en el año 2021, perteneciente al Plan Estadístico Nacional 2017-2020, ha sido realizada por el Ministerio de Cultura y Deporte junto al Consejo Superior de Deportes, y ha contado con la colaboración del Instituto Nacional de Estadística en su diseño muestral. En ella han participado ciudadanos de 15 años en adelante, y su finalidad principal es obtener indicadores relativos a los hábitos deportivos de los españoles (Ministerio de Cultura y Deporte, 2021). Esta encuesta posiciona al ciclismo como el segundo deporte más practicado en España en el año 2020, con el 31.3% del porcentaje de la población que practicó algún deporte en el último año. Según los datos aportados por esta encuesta, en los hogares de un 49.8% de la población española se dispone de al menos una bicicleta, siendo el equipamiento deportivo mayoritario en los hogares en 2020. Sin embargo, el porcentaje de personas que practican ciclismo en 2020 ha descendido respecto de la anterior encuesta de hábitos deportivos en España publicada en 2015, en un 7.4%.

Una manera de cuantificar los ciclistas que circulan por las carreteras españolas es observando el número de ciclistas federados y su evolución en los últimos años. El Anuario de Estadísticas Deportivas realizado por el Ministerio de Cultura y Deporte (2021) ofrece datos del número de licencias federativas de ciclistas y de clubes ciclistas registradas en los últimos años. El número de ciclistas federados en España ha aumentado en las últimas décadas, tal y como se muestra en la Figura 1 (Ministerio de Cultura y Deporte, 2021), registrando un aumento del 49% en el año 2020 respecto del 2008, no obstante el número de ciclistas federados ha presentado una variación mínima desde el 2015 hasta el 2020. El 93% de los ciclistas federados en 2020 fueron hombres, mientras que el 6.7 % restante fueron mujeres, sin embargo, el número de mujeres ha aumentado en el último año en un 0.2%.

La Comunitat Valenciana es la tercera comunidad autónoma con más ciclistas federados en el año 2020, registrando 8,852 ciclistas federados, un número muy cercano a las dos primeras comunidades autónomas que fueron Andalucía y Cataluña. A su vez, el número de clubes ciclistas federados también ha aumentado, alcanzando en el año 2020 los 3,634 clubes ciclistas federados en España.

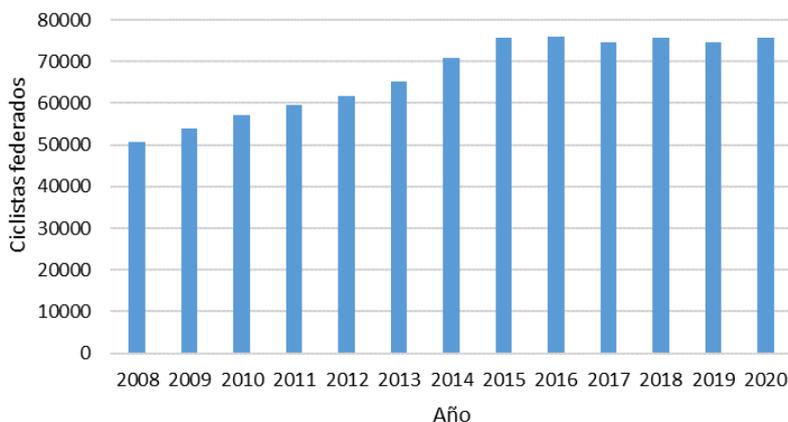


Figura 1. Evolución del número de licencias federativas de ciclistas en el periodo 2008-2020 (Ministerio de Cultura y Deporte, 2021).

Sin embargo, no todos los ciclistas que circulan por las carreteras convencionales disponen de licencia federativa, siendo la demanda ciclista real superior al número de ciclistas federados. En los últimos años la evolución de la tecnología que permite registrar datos de trayectorias y recorridos durante las actividades físicas ha sido enorme.

En la actualidad existen numerosas aplicaciones deportivas que permiten registrar las trayectorias de los ciclistas y convertirlas en datos de rendimiento deportivo. Estas aplicaciones deportivas representan una potencial fuente de datos en cuanto a recorridos y velocidades de los ciclistas, sobre todo para el estudio de la demanda ciclista existente en cada carretera. Una de las principales plataformas deportivas que actualmente son utilizadas por ciclistas de carretera es Strava. Esta aplicación es la más utilizada en el mundo en cuanto a registros de recorridos de ciclistas, permite visualizar un mapa de calor a nivel mundial en el que se muestran las rutas registradas durante los dos últimos años por los ciclistas usuarios de la aplicación. Este mapa de calor dispone actualmente de más de 700 millones de actividades registradas y permite identificar las rutas más utilizadas por los ciclistas registrados en la aplicación.

Por otra parte, Strava publica cada año un informe con estadísticas generales de uso de la aplicación por parte de deportistas que permiten conocer el comportamiento de estos en sus recorridos por las carreteras convencionales. En el informe anual correspondiente a 2019 (Strava, 2019) se reportó que el 44% de todas las salidas de ciclistas se realizaron, al menos, junto a otra persona, indicando la importancia de la circulación de ciclistas deportivos en grupo. En el informe anual de Strava correspondiente a 2020 (Strava, 2020), a pesar de ser un año marcado por la pandemia mundial de la Covid-19, se registraron en España más de 954 millones de km de recorridos ciclistas, con una distancia media de recorrido de 38.6 km para hombres y de 30.3 km para mujeres. La duración media de los recorridos registrados en 2020 fue de 1 h y 52 minutos para hombres y de 1h y 38 minutos para mujeres. En este informe anual de 2020 se pueden observar los patrones horarios de la hora de inicio en las actividades registradas por ciclistas en dos meses diferentes del año 2020 (Figura 2), se observan dos picos claramente

diferenciados para los días entre semana, aprovechando las horas de sol según la estación del año, mientras que para el fin de semana se observa un pico más pronunciado por la mañana.

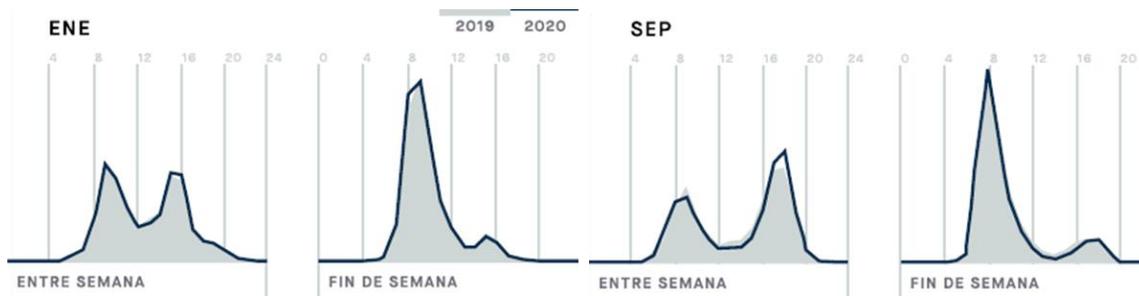


Figura 2. Hora de inicio de registros de recorridos ciclistas en Strava en enero y septiembre de 2019 y 2020 en España (Strava, 2020).

Córdoba Baviera (2019) realizó un Trabajo final de Máster, en colaboración con el Grupo de Investigación de Carreteras de la Universitat Politècnica de València, en el que se estimaron datos de demanda ciclista basándose en los registros facilitados por Strava. En este TFM se realizaron aforos en varios puntos de carreteras convencionales situadas en la provincia de València, y se compararon los valores observados en los aforos con los registrados mediante la aplicación deportiva Strava, obteniendo así el índice SUR (Strava usage rate), que representa el porcentaje de ciclistas usuarios de Strava respecto del total de ciclistas aforados a partir de observaciones que han circulado por un punto de control en un periodo de tiempo dado (Ecuación 1).

$$SUR(\%) = \frac{Volumen\ Strava}{Volumen\ observado} * 100 \quad (1)$$

Este porcentaje SUR ya fue definido y calculado en una primera aproximación utilizando un número menor de observaciones por García et al. (2017). El porcentaje SUR indica la representatividad de Strava respecto de la demanda ciclista real, y se calculó para cada una de las tres zonas de estudio, considerando en cada una de ellas un elevado número de puntos de control. Sin embargo, para que este coeficiente tenga una validez elevada no es tan importante el valor que alcance como su estabilidad, resultando en los casos en los que el coeficiente SUR se mantenga constante, un buen método para estimar la demanda ciclista asociada a esas zonas de estudio.

La metodología de extracción de datos de la plataforma Strava utilizada en este TFM, así como las herramientas desarrolladas para tal fin, fueron desarrolladas por el Profesor Dr. Mike Lowry de la Universidad de Idaho (USA) en el marco del proyecto Strava4Bikes financiado por la Dirección General de Tráfico y en colaboración con el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras. En este estudio se aforaron un total de 72 tramos de carretera convencional repartidos en tres zonas de estudio, considerando una variabilidad temporal en cuanto a la realización de los aforos, tomando datos en días laborables y festivos, así como en diferentes estaciones del año. Las tres zonas de estudio en las que se desarrolló esta investigación para estimar la demanda ciclista y la variabilidad temporal de esta demanda corresponden con las mismas zonas de estudio en las que se ha desarrollado la presente tesis doctoral.

Los resultados obtenidos en este estudio de la demanda ciclista en carreteras convencionales mostraron un valor del coeficiente SUR del 27% para la zona de Bétera, del 23% para la zona del Saler y del 26% para la zona de Montserrat, indicando que para las tres zonas de estudio, el

porcentaje de ciclistas que utilizaron Strava respecto del total de ciclistas aforados supuso unos valores suficientemente estables validando el modelo de predicción de la demanda ciclista mediante el uso de datos proporcionados por la plataforma deportiva Strava, siempre y cuando se dispusiese de aforos en los que se registrasen como mínimo 150 ciclistas.

En este estudio también se identificó la variabilidad temporal de la demanda ciclista en los diferentes tramos de carretera convencional en los que se desarrolló la investigación. Para analizar la variabilidad temporal se partió de los datos de ciclistas registrados en Strava en un segmento de carretera durante todo un año, identificando el tiempo de entrada al tramo de cada usuario. A partir de estos datos se calcularon unos factores para cada segmento de carretera considerando la variabilidad estacional, mensual, diaria y horaria. Como conclusión se observó una variación horaria de la demanda ciclista presentando un pico de la demanda dependiente del día de la semana en el que se disponga de estos resultados.

En la Figura 3 se observa esta variación horaria y diaria en la demanda ciclista obtenida mediante los datos de demanda aportados por la plataforma Strava para un tramo de carretera convencional, en esta figura concretamente para los días laborables se observan dos picos correspondientes a la mañana y a la tarde, mientras que en los días correspondientes al fin de semana se observa un solo pico mucho más acusado durante el periodo de mañana. Este patrón se identifica en la mayoría de tramos analizados en el estudio realizado por Córdoba Baviera (2019).

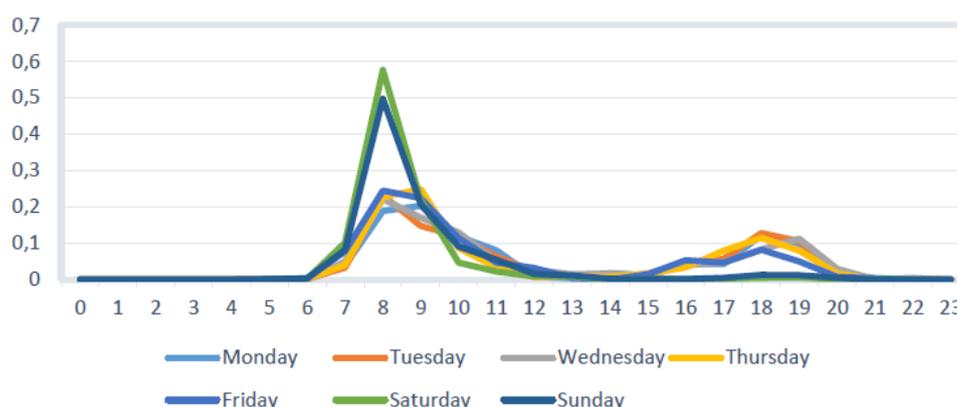


Figura 3. Representación de la distribución horaria y diaria de la demanda ciclista en un segmento de carretera (Córdoba Baviera, 2019).

Los horarios en los que se registra cada pico dependen del sentido de recorrido del tramo y de su distancia a las zonas residenciales en las que viven los ciclistas, registrando el pico más temprano para tramos más cercanos a las zonas residenciales y en sentido ida.

Los resultados obtenidos por Córdoba Baviera (2019) pusieron de manifiesto el potencial de uso en cuanto a la obtención de datos de demanda ciclista que ofrecen las aplicaciones deportivas, y su elevada representatividad en cuanto al ciclismo deportivo de carretera. Los resultados aportados se utilizaron para realizar la selección de las zonas de estudio de la presente tesis doctoral, así como para determinar también el calendario de tomas de datos, en cuanto a la elección del día de la semana y horarios en los que se realizaron las tomas de datos.

El uso de los datos aportados por la plataforma deportiva Strava para estimar la demanda ciclista en tramos de carretera convencional mediante la metodología del coeficiente SUR también fue descrito por Camacho-Torregrosa et al. (2021), quienes analizaron la representatividad del

coeficiente SUR en seis puntos de control de diferentes carreteras convencionales en las que se tomaron datos durante varias jornadas cubriendo variaciones horarias, diarias y estacionarias. Camacho-Torregrosa et al. (2021) concluyeron que mediante el uso del coeficiente SUR calculado a partir de observaciones en las que se hayan registrado un número de ciclistas suficientes, se puede determinar correctamente la variación horaria de la demanda ciclista e incluso relacionarla con la accidentalidad en diferentes puntos de control situados en carreteras convencionales.

2.1.2 Siniestralidad ciclista en carreteras convencionales

Paralelamente al aumento del número de ciclistas en las carreteras convencionales de los últimos años también ha aumentado el número de accidentes con ciclistas involucrados. En este epígrafe se presentan algunos datos de siniestralidad ciclista en carreteras convencionales a nivel europeo, estatal, autonómico y provincial.

En Europa, las muertes de ciclistas decrecen ocho veces más lentamente que las muertes de ocupantes de vehículos a motor; de hecho, la reducción de víctimas mortales ciclistas registradas en la Unión Europea en 2018 respecto de 2010 ha sido del 0%, siendo el 83% de las muertes de ciclistas registradas consecuencia del impacto con un vehículo motorizado (European Transport Safety Council, 2020). El número de muertes de ciclistas ha disminuido solo un 0.4% en promedio cada año en los países de la Unión Europea durante el período 2010 a 2018 en comparación con una reducción anual del 3.1% en las muertes de usuarios de vehículos motorizados durante el mismo período.

En la Figura 4 se observa el cambio registrado en el número de víctimas ciclistas fallecidas entre 2018 y 2010 en cada país de la Unión Europea correspondiente a las barras de color, mientras que en las barras sin color se representa la variación en el número de víctimas usuarios de vehículos motorizados. La media de reducción de muertes de ciclistas de todos los países de la Unión Europea se representa por la línea color azul, mientras que la media de la reducción de las víctimas de vehículos motorizados se representa mediante la línea discontinua. Se observa que sólo en nueve países presentados en la Figura 4 se redujeron las muertes de ciclistas a un ritmo más rápido que las muertes de conductores. Desde principios de la década, las muertes de ciclistas disminuyeron en 12 países de la Unión Europea, se estancaron en dos y aumentaron en 10 (Figura 4). En España particularmente se observa un crecimiento cercano al 1% en las muertes de ciclistas en el periodo 2010-2018, mientras las muertes de usuarios de vehículos motorizados han descendido en torno al 3.2%.

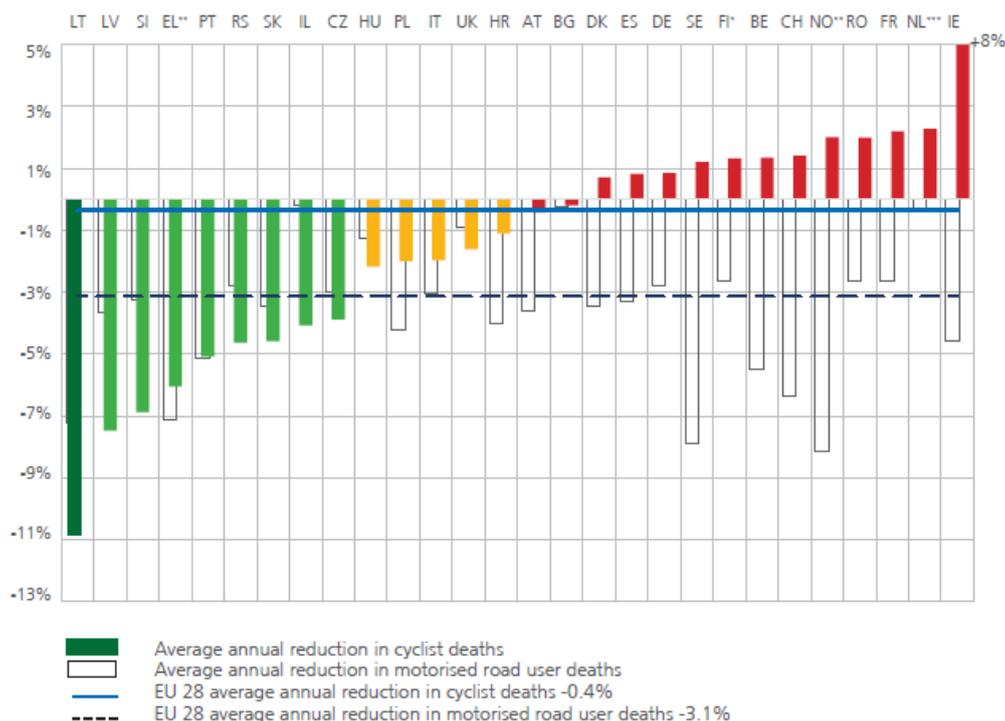


Figura 4. Cambio promedio anual en las muertes de ciclistas en comparación con el cambio promedio anual en las muertes de usuarios motorizados de la vía pública registrados durante el período 2010-2018 (European Transport Safety Council, 2020).

A nivel estatal, la Dirección General de Tráfico presenta cada año las Principales Cifras de la Siniestralidad Vial en España, donde se reportan los accidentes de tráfico registrados cada año, con el fin de facilitar el análisis de la evolución del número de accidentes y sus características. En el último informe, presentado en 2019, se registraron en España 7,837 accidentes con ciclistas implicados (Dirección General de Tráfico, 2019a), y aunque la mayor parte de estos accidentes se produjo en vías urbanas (un 72%), fue en las vías interurbanas donde se registró el mayor porcentaje de las víctimas mortales (un 60%), poniendo de manifiesto la especial gravedad de los accidentes registrados en carreteras convencionales.

Concretamente, en 2019 murieron 48 ciclistas en vías interurbanas, 5 más que en 2018. En la Figura 5 se muestra la evolución de los ciclistas fallecidos y heridos hospitalizados en vías urbanas e interurbanas en el periodo 2010-2019, se observa como el número de víctimas mortales ciclistas en carreteras interurbanas no ha presentado una reducción clara en la última década, manteniéndose en un valor medio estabilizado alrededor de 50 ciclistas fallecidos al año, siendo este número más elevado que en vías urbanas. En el total de ciclistas heridos hospitalizados tampoco se aprecia un descenso claro en la última década, presentando valores cercanos los registrados en entorno urbano e interurbano.



Figura 5. Evolución de los fallecidos y heridos hospitalizados en bicicletas en vías interurbanas y urbanas en España (2010-2019) (Dirección General de Tráfico, 2019a).

Estos valores elevados de accidentalidad ciclista y su no reducción en los últimos años ponen de manifiesto la necesidad de analizar los conflictos que involucran a estos usuarios en carretera con el fin de proponer medidas que reduzcan su accidentalidad y ayuden a integrar a los ciclistas en entornos interurbanos de manera más segura y eficaz.

A nivel autonómico, la Generalitat Valenciana ha creado una base de datos de accidentes ciclistas registrados entre 2012 y 2016 en forma de mapa, en la que se pueden consultar los accidentes con ciclistas implicados clasificados por su gravedad en mortales, graves, leves y sin heridos, y su localización en la red de carreteras de la Generalitat Valenciana (Generalitat Valenciana, 2020a). A partir de este mapa (ver Figura 6) se pueden identificar los tramos de carretera con una mayor frecuencia de accidentes ciclistas, así como su gravedad.

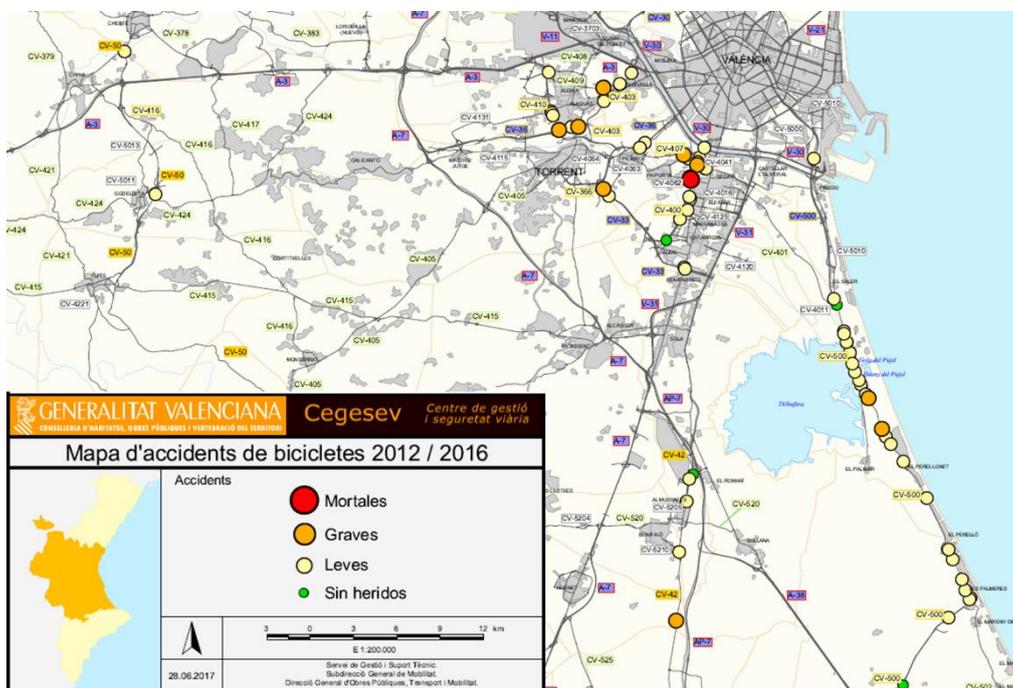


Figura 6. Mapa de accidentes de bicicletas 2012-2016 correspondiente a la zona centro (Generalitat Valenciana, 2020a).

Centrando la investigación en el entorno particular de la provincia de València, la Diputació de València presentó un informe en 2015 titulado “Caracterización de la Accidentalidad ciclista en

la Red de Carreteras de la Diputación de Valencia (2009-2014)” en el que se analizaron datos de 191 accidentes con ciclistas implicados recogidos en carreteras convencionales en ese periodo (Diputació de València, 2015).

A partir del análisis de estos accidentes se caracterizó la accidentalidad ciclista según varios factores. Las conclusiones principales fueron que en el 64% de los accidentes con ciclistas hubo un vehículo a motor implicado, y que de estos en el 83% de los casos el ciclista circulaba solo. En cuanto a la distribución de accidentes por tipo de tramo, el mayor porcentaje de accidentes se producen en intersección (43%), mientras que el 36% de los accidentes se registraron en rectas y el 21% restante en curvas. De los 68 accidentes ocurridos en recta, el 60% fueron colisiones, mayoritariamente de bicicletas con otros vehículos. Analizando las colisiones en recta, las mayoritarias son colisiones laterales y alcances o colisiones múltiples, se destaca que no se ha producido ninguna colisión frontal. Analizando las colisiones en curva, cuando intervino otro vehículo a motor en el accidente los accidentes más comunes fueron la colisión frontal y el alcance, 29% ambos; seguidos de colisión lateral (21%), y frontolateral (14%).

En el 69% de los accidentes entre ciclistas y motorizados los ciclistas seguían ruta, mientras que en un 12% se encontraban en una intersección. En cuanto a los otros conductores implicados en accidentes con ciclistas, el 22% no cometió infracción alguna, siendo en el resto de casos las infracciones más frecuentes la conducción distraída en un 17%, el no cumplir la señal de ceda el paso en un 14%, y el no cumplir la señal de STOP en un 10%. La variación temporal de los accidentes registrados indicó un número más elevado de accidentes en los meses con más horas de luz, y durante los fines de semana. En cuanto a la hora, la mayoría de accidentes se presentan en horario de mañana, hacia las 11 h, presentando otro pico menor a las 20 h.

En cuanto a los factores concurrentes, el factor inherente al conductor estuvo presente en casi la mitad de los accidentes, mientras que el factor infracción a la norma es responsable del 42% de los accidentes. Tan solo en un 5% de los accidentes la causa fue relativa a la vía.

Estos resultados reflejan la peligrosidad de los accidentes entre ciclistas y vehículos motorizados en carreteras convencionales.

2.2 Actuaciones de las Administraciones Públicas relacionadas con el ciclismo

En el estudio emitido por el European Transport Safety Council (2020) se analizaron los datos de siniestralidad ciclista reportados en la Unión Europea en los últimos años, poniendo de manifiesto la necesidad de realizar políticas enfocadas a la prevención y a la reducción de la siniestralidad ciclista. En este documento se realizaron una serie de recomendaciones y mejoras enfocadas a aumentar la seguridad del colectivo ciclista, sin embargo, muchas de ellas están enfocadas al entorno urbano, careciendo de eficacia en las carreteras. Algunas de estas recomendaciones fueron reducir velocidades de los vehículos motorizados, separar las infraestructuras para ciclistas del tráfico motorizado y mejorar el cumplimiento de la normativa. Este estudio concluyó que parte del problema actual es que en la Unión Europea muchas infraestructuras no han sido diseñadas pensando en los ciclistas.

La Unión Europea publicó en 2019 la Directiva 2019/1936 enfocada a aproximarse al objetivo de cero víctimas mortales de aquí a 2050, y a alcanzar el nuevo objetivo intermedio que consiste en reducir a la mitad el número de heridos graves de aquí a 2030 respecto al nivel de 2020 (Comisión Europea, 2019). En esta Directiva se pretende desarrollar requisitos de calidad para las infraestructuras destinadas a usuarios vulnerables, mejorando su seguridad en la vía pública.

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, 2019b), 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.
- Coordinar la acción del Estado.

Para conseguir estas prioridades u objetivos se plantean seis ejes de actuación formados por varias áreas estratégicas en las que se definen actuaciones específicas. La Estrategia de la Bicicleta plantea una serie de actuaciones enfocadas a la circulación ciclista segura, que, aunque no están centradas en el entorno interurbano exclusivamente, se pueden extrapolar en este entorno, como la formación de los ciclistas en circulación segura, habilidades sobre bicicleta, mecánica básica y primeros auxilios, así como el uso correcto de dispositivos de seguridad activa y protecciones, contribuyendo todas ellas a la mejora de la seguridad vial. Por otra parte, se hace necesario que conductores y motoristas conozcan cómo se circula en bicicleta y se formen en buenos hábitos de conducción para compatibilizar la coexistencia de ambos usuarios.

Observando las actuaciones centradas en el entorno interurbano, y en la circulación de ciclistas deportivos por este entorno realizadas en España en los últimos años, en varios tramos de carretera convencional se han instalado señales dinámicas de advertencia a los conductores de la presencia de ciclistas. Estas señales disponen de un sistema de detección de ciclistas que activa la señal, encendiendo luces o activando un mensaje en el que se advierte de la presencia de ciclistas en la carretera. Algunas de estas señales se pueden ver en la Figura 7. Estas señales se suelen utilizar en tramos con problemas de visibilidad y con elevada presencia de ciclistas.



Figura 7. Señal dinámica incorporada a las carreteras de La Rioja en 2017 (izquierda) y de Pontevedra en 2018 (derecha) (Revista DGT).

2.2.1 Regulación legal

En este apartado se revisan las principales normativas que regulan la circulación de ciclistas en carreteras convencionales en España, y seguidamente las normativas a nivel internacional que regulan la separación lateral mínima exigida durante el adelantamiento a ciclistas.

La principal normativa española que regula la circulación de vehículos motorizados y ciclistas en carretera es el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003) aprobado por el Real Decreto 1428/2003, de 21 de noviembre. La circulación de ciclistas en carretera convencional, y su interacción con vehículos a motor, se regula concretamente en diversos apartados de este Reglamento citados a continuación.

En el *TÍTULO II De la circulación de vehículos, CAPÍTULO I Lugar en la vía, Sección 3.ª Arcenes, Artículo 36. Conductores obligados a su utilización* se especifica literalmente:

1. *Los conductores de vehículos de tracción animal, vehículos especiales con masa máxima autorizada no superior a 3.500 kilogramos, ciclos, ciclomotores, vehículos para personas de movilidad reducida o vehículos en seguimiento de ciclistas, en el caso de que no exista vía o parte de ella que les esté especialmente destinada, circularán por el arcén de su derecha, si fuera transitable y suficiente para cada uno de éstos, y, si no lo fuera, utilizarán la parte imprescindible de la calzada. En los descensos prolongados con curvas, cuando razones de seguridad lo permitan, los conductores de bicicletas podrán abandonar el arcén y circular por la parte derecha de la calzada que necesiten.*
2. *Se prohíbe que los vehículos enumerados en el apartado anterior circulen en posición paralela, salvo las bicicletas, que podrán hacerlo en columna de a dos, orillándose todo lo posible al extremo derecho de la vía y colocándose en hilera en tramos sin visibilidad, y cuando formen aglomeraciones de tráfico. En las autovías sólo podrán circular por el arcén, sin invadir la calzada en ningún caso.*
3. *El conductor de cualquiera de los vehículos enumerados en el apartado 1, excepto las bicicletas, no podrá adelantar a otro si la duración de la marcha de los vehículos colocados paralelamente excede los 15 segundos o el recorrido efectuado en dicha forma supera los 200 metros.*

En el *CAPÍTULO II Velocidad. Sección 1.ª Límites de velocidad. Artículo 46. Moderación de la velocidad. Casos*, se especifica literalmente:

1. *Se circulará a velocidad moderada y, si fuera preciso, se detendrá el vehículo cuando las circunstancias lo exijan, especialmente en los casos siguientes:*
 - b) *Al aproximarse a ciclos circulando, así como en las intersecciones y en las proximidades de vías de uso exclusivo de ciclos.*
 - f) *Fuera de poblado al acercarse a vehículos inmovilizados en la calzada y a ciclos que circulan por ella o por su arcén.*

Artículo 48. Velocidades máximas en vías fuera de poblado.

1. *Las velocidades máximas que no deberán ser rebasadas, salvo en los supuestos previstos en el artículo 51, son las siguientes:*
 - a) *Turismos, motocicletas, autocaravanas de masa máxima autorizada igual o inferior a 3.500 kg, Pick-up, autobuses, vehículos derivados de turismo y vehículos mixtos adaptables en carretera convencional: 90 km/h. Camiones, tractocamiones, furgonetas, autocaravanas de masa máxima autorizada superior a 3.500 kg,*

vehículos articulados, automóviles con remolque y resto de vehículos en carretera convencional: 80 km/h.

d) Para ciclos, ciclomotores de dos y tres ruedas y cuadríciclos ligeros: 45 kilómetros por hora. No obstante, los conductores de bicicletas podrán superar dicha velocidad máxima en aquellos tramos en los que las circunstancias de la vía permitan desarrollar una velocidad superior.

En el **CAPÍTULO II Velocidad. Sección 2.ª Reducción de velocidad y distancias entre vehículos. Artículo 54. Distancias entre vehículos**, se especifica literalmente:

- 1. Todo conductor de un vehículo que circule detrás de otro deberá dejar entre ambos un espacio libre que le permita detenerse, en caso de frenado brusco, sin colisionar con él, teniendo en cuenta especialmente la velocidad y las condiciones de adherencia y frenado. No obstante, se permitirá a los conductores de bicicletas circular en grupo sin mantener tal separación, extremando en esta ocasión la atención, a fin de evitar alcances entre ellos (artículo 20.2 del texto articulado).*

En el **CAPÍTULO III Prioridad de paso. Sección 3.ª Normas de comportamiento de los conductores respecto a los ciclistas, peatones y animales. Artículo 64. Normas generales y prioridad de paso de ciclistas**, se especifica literalmente:

Los conductores de bicicletas tienen prioridad de paso respecto a los vehículos de motor:

- a) Cuando circulen por un carril bici, paso para ciclistas o arcén debidamente señalizados.*
- b) Cuando para entrar en otra vía el vehículo de motor gire a derecha o izquierda, en los supuestos permitidos, y haya un ciclista en sus proximidades.*
- c) Cuando circulando en grupo, el primero haya iniciado ya el cruce o haya entrado en una glorieta.*

En los demás casos serán aplicables las normas generales sobre prioridad de paso entre vehículos.

En el **CAPÍTULO VII Adelantamiento. Sección 2.ª Normas generales del adelantamiento. Artículo 84. Obligaciones del que adelanta antes de iniciar la maniobra**, se especifica literalmente:

- 1. Antes de iniciar un adelantamiento que requiera desplazamiento lateral, el conductor que se proponga adelantar deberá advertirlo con suficiente antelación con las señales preceptivas y comprobar que en el carril que pretende utilizar para el adelantamiento existe espacio libre suficiente para que la maniobra no ponga en peligro ni entorpezca a quienes circulen en sentido contrario, teniendo en cuenta la velocidad propia y la de los demás usuarios afectados. En caso contrario, deberá abstenerse de efectuarla (artículo 33.1 del texto articulado). Ningún conductor deberá de adelantar a varios vehículos si no tiene la total seguridad de que, al presentarse otro en sentido contrario, puede desviarse hacia el lado derecho sin causar perjuicios o poner en situación de peligro a alguno de los vehículos adelantados. En calzadas con doble sentido de circulación y tres carriles separados por marcas longitudinales discontinuas, el adelantamiento solamente se podrá efectuar cuando los conductores que circulen en sentido contrario no hayan ocupado el carril central para efectuar un adelantamiento a su vez.*
- 2. También deberá cerciorarse de que el conductor del vehículo que le precede en el mismo carril no ha indicado su propósito de desplazamiento hacia el mismo lado; en tal caso, deberá respetar la preferencia que le asiste. No obstante, si después de un tiempo prudencial el conductor del citado vehículo no ejerciera su derecho*

prioritario, se podrá iniciar la maniobra de adelantamiento, advirtiéndoselo previamente con señal acústica u óptica (artículo 33.2 del texto articulado). Se prohíbe, en todo caso, adelantar a los vehículos que ya estén adelantando a otro si el conductor del tercer vehículo, para efectuar dicha maniobra, ha de invadir la parte de la calzada reservada a la circulación en sentido contrario.

3. Asimismo, deberá asegurarse de que ningún conductor que le siga por el mismo carril ha iniciado la maniobra de adelantar a su vehículo, y de que dispone de espacio suficiente para reintegrarse a su carril cuando termine el adelantamiento (artículo 33.3 del texto articulado).
4. Las señales preceptivas que el conductor deberá utilizar antes de iniciar su desplazamiento lateral serán las prescritas en el artículo 109.
5. A los efectos de este artículo, no se consideran adelantamientos los producidos entre ciclistas que circulen en grupo (artículo 33.4 del texto articulado).
6. Las infracciones a las normas de este artículo tendrán la consideración de graves, conforme se prevé en el artículo 65.4.c) del texto articulado.

En la Sección 3.ª Ejecución del adelantamiento. Artículo 85. Obligaciones del que adelanta durante la ejecución de la maniobra, se especifica literalmente:

1. Durante la ejecución del adelantamiento, el conductor que lo efectúe deberá llevar su vehículo a una velocidad notoriamente superior a la del que pretende adelantar y dejar entre ambos una separación lateral suficiente para realizarlo con seguridad (artículo 34.1 del texto articulado).
2. Si después de iniciar la maniobra de adelantamiento advirtiera que se producen circunstancias que puedan hacer difícil su finalización sin provocar riesgos, reducirá rápidamente su marcha, regresará de nuevo a su carril y lo advertirá a los que le siguen con las señales preceptivas (artículo 34.2 del texto articulado).
3. El conductor del vehículo que ha efectuado el adelantamiento deberá reintegrarse a su carril tan pronto como le sea posible y de modo gradual, sin obligar a otros usuarios a modificar su trayectoria o velocidad, y advertirlo a través de las señales preceptivas (artículo 34.3 del texto articulado).
4. Cuando se adelante fuera de poblado a peatones, animales o a vehículos de dos ruedas o de tracción animal, se deberá realizar la maniobra ocupando parte o la totalidad del carril contiguo de la calzada, siempre y cuando existan las condiciones precisas para realizar el adelantamiento en las condiciones previstas en este reglamento; en todo caso, la separación lateral no será inferior a 1,50 metros. Queda expresamente prohibido adelantar poniendo en peligro o entorpeciendo a ciclistas que circulen en sentido contrario. Cuando el adelantamiento se efectúe a cualquier otro vehículo distinto de los aludidos en el párrafo anterior, o tenga lugar en poblado, el conductor del vehículo que ha de adelantar dejará un margen lateral de seguridad proporcional a la velocidad y a la anchura y características de la calzada.
5. El conductor de un vehículo de dos ruedas que pretenda adelantar fuera de poblado a otro cualquiera lo hará de forma que entre aquél y las partes más salientes del vehículo que adelanta quede un espacio no inferior a 1,50 metros.
6. Las infracciones a las normas de este precepto tendrán la consideración de graves, conforme se prevé en el artículo 65.4.c) del texto articulado.

En el *CAPÍTULO II Cinturón, casco y restantes elementos de seguridad. Artículo 118. Cascos y otros elementos de protección*, se especifica literalmente:

Los conductores de bicicletas y, en su caso, los ocupantes estarán obligados a utilizar cascos de protección homologados o certificados según la legislación vigente, cuando circulen en vías interurbanas, salvo en rampas ascendentes prolongadas, o por razones médicas que se acreditarán conforme establece el artículo 119.3, o en condiciones extremas de calor.

A nivel internacional existen algunas normativas específicas en el ámbito del ciclismo en carretera convencional. Estas normativas se refieren, en su mayor parte, a la separación mínima exigida durante el adelantamiento a ciclistas. En este apartado se resumen las principales normativas en este sentido vigentes en otros países.

En Australia existe una ley que exige una separación mínima entre vehículos y bicicletas durante el adelantamiento de 1 m cuando se adelanta a ciclistas en zonas con velocidad límite igual o menor a 60 km/h, mientras que la separación lateral mínima exigida es de 1.5 m para zonas con velocidades límite mayores a 60 km/h. Esta ley fue incorporada a los distintos estados australianos desde 2015 hasta 2021, cuando finalmente se ha establecido en el estado de Victoria. Esta separación mínima fue asesorada durante su instauración por diversos estudios que validaron su eficacia (Beck et al., 2019; Debnath et al., 2018; Haworth et al., 2018b, 2014; Mackenzie et al., 2021; Schramm et al., 2016).

En Estados Unidos de América en febrero de 2021 un total de 33 estados (Alabama, Arizona, Arkansas, California, Colorado, Connecticut, Delaware, Florida, Georgia, Hawaii, Illinois, Kansas, Kentucky, Louisiana, Maine, Maryland, Michigan, Minnesota, Mississippi, Nebraska, Nevada, New Hampshire, Ohio, Oklahoma, Pennsylvania, South Dakota, Tennessee, Virginia, Utah, Washington, West Virginia, Wisconsin and Wyoming) incorporaron normativas que regulan la separación mínima durante el adelantamiento a ciclistas, exigiendo como mínimo 3 pies (0.91 m) de distancia, equivalente a 0.91 m. North Carolina exige 2 pies (0.61 m) de separación entre conductores y ciclistas, y permite el adelantamiento a ciclistas en zonas de adelantamiento prohibido siempre que el conductor respete una distancia lateral de 4 pies. Pennsylvania exige 4 pies (1.22 m) en todos los adelantamientos a ciclistas, mientras que South Dakota ha incluido una normativa que exige una separación lateral mínima de 3 pies para zonas con velocidades límite menores o iguales a 35 mi/h y de 6 pies (1.83 m) para zonas con velocidades límite mayores a 35 mi/h. En otros 8 estados, existen leyes generales que establecen que los conductores deben adelantar a una "distancia segura" sin especificar valores. Por lo general, estas leyes establecen que los vehículos deben adelantar a los ciclistas a una distancia y velocidad seguras; la ley de Montana, por ejemplo, requiere que un conductor alcance y rebase a una persona en bicicleta sólo cuando el conductor del vehículo motorizado pueda hacerlo de manera segura sin poner en peligro a la persona que monta la bicicleta.

En Canadá siete provincias disponen de una ley que regula la distancia lateral mínima exigida al adelantar a ciclistas, siendo de 1 m para zonas con velocidades límite iguales o menores a 60 km/h y de 1.5 m para zonas con velocidades límite mayores a 60 km/h.

Francia, Portugal, Alemania y Bélgica han incorporado normativas que exigen una separación lateral mínima de 1.5 m al adelantar a ciclistas en carretera, al igual que España. En Irlanda la normativa recomienda una separación lateral entre vehículos motorizados y ciclistas de 1 m en zonas con límite de velocidad menor de 50 km/h y de 1.5 m en zonas con límite de velocidad igual o mayor a 50 km/h. En Alemania, recientemente se exige una separación lateral mínima

de 1.5 m en zonas urbanas, mientras que en zonas interurbanas la separación lateral mínima legal es de 2 m. Finalmente, en la provincia de Western Cape, en Sudáfrica, también se ha incorporado una normativa que regula la separación mínima durante el adelantamiento a ciclistas exigiendo 1 m.

2.2.2 Actuaciones específicas en la Comunitat Valenciana enfocadas al ciclismo de carretera

En la Generalitat Valenciana, a la vista del aumento de la siniestralidad ciclista en carretera en los últimos años, se puso en marcha un plan de choque para la reducción de esta siniestralidad que tomó forma mediante el Libro Blanco sobre La Protección de las personas usuarias de la bicicleta en la Comunitat Valenciana (Generalitat Valenciana, 2017). En este estudio participaron las Diputaciones, tres Consellerías y varias entidades y organismos implicados. En el estudio se presentan datos de siniestralidad ciclista en la Comunitat Valenciana, y se analizan los principales factores asociados a esta siniestralidad, identificando las carreteras convencionales en las que se han presentado un mayor número de accidentes. Finalmente se proponen medidas para mejorar la seguridad del colectivo ciclista en carretera. Las medidas y propuestas se plantean sobre la base de la colaboración entre las distintas administraciones y las federaciones deportivas, materializándose con la puesta en marcha de Planes de acción específicos, desarrollados en el marco del Plan Director de Seguridad Vial de la Generalidad Valenciana (PDSV) (Generalitat Valenciana, 2017). Algunas de las medidas propuestas son:

- *Modificación de la normativa.* Se elevó de rango normativo el adelantamiento a ciclistas, exigiendo el 1.5 m mínimo de separación lateral y prohibiendo el adelantamiento peligroso y con ciclistas en sentido opuesto. Se está estudiando la modificación del código penal para endurecer las penas en los delitos que supongan víctimas ciclistas de los conductores bajo efectos de alcohol y drogas, así como de la omisión de socorro. Se han planteado diversos grupos de trabajo para revisar y modificar si procede la normativa actual en este campo.
- *Vigilancia/sanciones.* Se han planeado una serie de campañas de control y vigilancia de la DGT en tramos de carretera con elevada presencia de ciclistas. Las diferentes Administraciones colaborarán en la identificación de estos tramos. Se utilizarán paneles de mensaje variable para concienciar para el respeto a los ciclistas durante los fines de semana. Se aumentarán los controles de alcoholemia tanto a conductores como a ciclistas.
- *Campañas de información/concienciación.* Uso de los medios de comunicación públicos para la difusión de estas campañas; y concienciación de la vulnerabilidad de los ciclistas sobre todo en ámbito interurbano.
- *Red viaria.* Elaboración por parte de la DGT de un mapa nacional de las rutas ciclistas seguras, seleccionadas por consenso entre: ATGC, Federación de Ciclismo, y los titulares de las vías. Señalización de tramos con elevada presencia ciclista para advertir al resto de usuarios. La señalización de los tramos se decide de forma conjunta y consensuada por la federación de ciclismo autonómica, el titular de la vía y la DGT. Actuaciones de mejora de tramos por parte de las Administraciones. Incorporación de aforos de ciclistas automáticos. Realización de análisis de siniestralidad identificando los tramos más peligrosos. La Diputació de València, ha ejecutado entre 2016 y 2017 las obras correspondientes al proyecto de "Señalización informativa específica para los ciclistas en la subida a 43 puertos de montaña afectando a 26 carreteras de la Red de Diputació de València. Se va a realizar un Estudio de Viabilidad de aquellas rutas o carreteras con

mayor tráfico ciclista para valorar la adopción de medidas de la mejora de las condiciones de seguridad, tales como ampliación de plataforma para dotarles de arcones bici, así como marca vial resaltada y señalización. Posteriormente se redactarán los correspondientes proyectos de construcción.

- *Educación vial.* Intervenciones en centros educativos, en Ayuntamientos y en espacios públicos destinadas a mejorar el conocimiento de la normativa y la conducta en bicicleta.
- *Vías ciclistas.* Identificación y señalización de estas vías. Aumentar la longitud de carriles segregados para la circulación exclusiva de ciclistas.

Muchas de estas medidas están actualmente en desarrollo, y su implementación todavía no ha sido analizada en profundidad.

2.3 Estudios de interacciones entre vehículos motorizados y bicicletas

Existen diversos estudios de tráfico ciclista y su interacción con vehículos a motor, pero la gran mayoría de ellos se han llevado a cabo en un entorno urbano. En carreteras convencionales, donde la interacción entre bicicletas y vehículos motorizados es más peligrosa debido a la diferencia entre sus velocidades, los estudios realizados se han centrado en la maniobra de adelantamiento, y sobre todo en la separación lateral entre el vehículo y la bicicleta durante esta maniobra.

En las diferentes investigaciones realizadas hasta el momento se ha caracterizado la maniobra de adelantamiento considerando diferentes variables, y utilizando diferentes metodologías de toma de datos. La mayoría de estos estudios se han llevado a cabo con datos de campo, utilizando mediciones de adelantamientos reales en la propia carretera.

En este apartado se describen los estudios más recientes según la metodología de tomas de datos que han utilizado. Finalmente se resumen las principales variables de estudio en las que se han centrado estas investigaciones.

2.3.1 Metodologías utilizadas para la obtención de datos

Las principales metodologías de toma de datos experimentales utilizadas en las investigaciones más recientes llevadas a cabo en el ámbito de las interacciones entre ciclistas y vehículos motorizados en carreteras convencionales se presentan en este apartado. Para cada una de las metodologías se describen las investigaciones realizadas en los últimos años, indicando las variables de estudio y las principales conclusiones de cada una de ellas.

2.3.1.1 Cámaras fijas

Las grabaciones realizadas por cámaras fijas permiten obtener datos de adelantamientos y de distancias y velocidades si las imágenes presentan un campo de visión suficientemente amplio. El número de datos obtenido depende de la resolución de las cámaras, su posición respecto de la vía, el volumen de tráfico registrado y el periodo y duración de la toma de datos. Esta metodología es compatible con el uso de ciclistas de apoyo que generen los adelantamientos en la zona de grabación.

Hunter et al. (2005) realizaron grabaciones puntuales en seis tramos y cuatro intersecciones de una carretera urbana en Florida (USA). Realizaron el estudio antes y después de la conversión de una carretera con carril compartido de 14 pies de ancho a una con un carril de circulación de vehículos de 11 pies y otro carril de uso exclusivo para ciclistas de 3 pies de ancho. En su estudio evaluaron las distancias entre vehículos y bicicletas, así como entre usuarios y el borde del carril

de alrededor de 260 imágenes extraídas de los vídeos. Compararon estas separaciones antes y después de la conversión de la carretera, concluyendo que tras incorporar el cambio en la carretera los ciclistas y conductores circulaban más lejos del borde del carril y con una mayor separación entre ellos, invadiendo menos el sentido opuesto.

Posteriormente, Savolainen et al. (2012) utilizaron video cámaras ubicadas en altura sobre postes cercanos a la carretera para analizar la separación lateral entre vehículos y bicicletas en dos segmentos de una carretera en Míchigan (USA) y analizar el efecto de bandas sonoras colocadas en las líneas de separación entre carriles. A partir de la visualización de los vídeos se obtuvieron diversas variables: posición del ciclista en la calzada, número de ciclistas que circulan en un grupo, tipo de vehículo adelantante, presencia de tráfico opuesto durante la maniobra de adelantamiento. Se obtuvieron resultados de 1,197 eventos en los que se registraron 398 ciclistas y 2,352 vehículos motorizados. Se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos en los dos tramos de estudio con y sin bandas sonoras. Los resultados mostraron que cuando existían bandas sonoras disminuyó la probabilidad de que los conductores contactasen con la línea central, los grupos de ciclistas aumentaron la invasión del carril opuesto comparado con los ciclistas individuales y la presencia de vehículos opuesto redujo el contacto con la línea central.

Recientemente, Mohammed et al. (2019) realizaron un estudio del comportamiento de los ciclistas en carriles específicos para ellos caracterizando maniobras de los ciclistas en las interacciones de seguimiento y adelantamiento entre ellos a partir de grabaciones estáticas de vídeo. Analizaron varias variables que potencialmente afectan el estado del ciclista y las decisiones futuras extraídas de los datos de video utilizando técnicas de visión por computadora, incluida la distancia longitudinal, la distancia lateral y la diferencia de velocidad entre los ciclistas que interactúan. Estas caracterizaciones son un paso clave hacia el desarrollo de modelos de microsimulación de tráfico de bicicletas basados en agentes, que se pueden utilizar para mejorar la planificación y el diseño de instalaciones para bicicletas, el modelado de seguridad y el modelado de energía.

2.3.1.2 Vehículo instrumentado

Otra modalidad de recolección de datos es el uso de cámaras situadas en un vehículo de tal manera que se graben las maniobras de adelantamiento que realiza el propio vehículo. A partir de estas imágenes se pueden obtener distancias y velocidades y analizar la maniobra de adelantamiento de una manera directa. La principal limitación de este método es la complejidad del proceso de reducción de datos, que comporta la revisión de las grabaciones y la sincronización de todos los dispositivos de medición utilizados.

Esta metodología de toma de datos fue utilizada por Feng et al. (2018), quienes analizaron la maniobra de adelantamiento entre vehículos motorizados y ciclistas desde la perspectiva del conductor a partir de datos proporcionados por sensores incorporados en los vehículos mediante un estudio naturalístico realizado en Michigan (USA). Analizaron un total de 4,789 maniobras de adelantamiento en las que la posición lateral del vehículo adelantante durante la maniobra se utilizó como medida subrogada de seguridad. Se examinaron varios factores, incluido el tipo de línea de separación de carriles, la presencia de un carril para bicicletas o arcén pavimentado, la presencia de tráfico opuesto, el ancho de carril y la distracción del conductor. Los resultados mostraron que cuando existía un carril para bicicletas o un arcén pavimentado el efecto de una línea discontinua no central (es decir, una línea discontinua que separa dos carriles en la misma dirección) se asoció con significativamente menos cruce de carriles de vehículos y con una distancia más cercana al carril de bicicletas o arcén comparado con una línea central

sólida. También se observó que un 7,8% de los adelantamientos se produjo cuando los conductores estaban distraídos dentro de los cinco segundos antes de adelantar a los ciclistas.

Posteriormente, Kovaceva et al. (2019) utilizaron datos del estudio naturalístico UDRIVE realizado a nivel europeo, concretamente utilizaron datos recogidos en Francia a partir de la instrumentación de 30 vehículos ligeros. Después de un cribado de los datos se incluyeron en el estudio 83 maniobras de adelantamiento realizadas a un ciclista circulando individualmente en tramos rectos de carretera convencional. Se identificaron las cuatro fases del adelantamiento definidas por Dozza et al. (2016) y se cuantificaron las distancias de seguridad al ciclista mostradas en la Figura 8. Se analizó el efecto de varios factores como la velocidad del vehículo, el tipo de maniobra, la presencia de tráfico opuesto y las características del conductor sobre las distancias al ciclista registradas en cada maniobra utilizando modelos lineales de efectos mixtos. Los resultados mostraron mayores distancias al ciclista durante la aproximación y el adelantamiento cuando el adelantante circulaba a mayor velocidad, mientras que cuando un vehículo opuesto estaba presente se registraron menores separaciones durante la fase de adelantamiento.

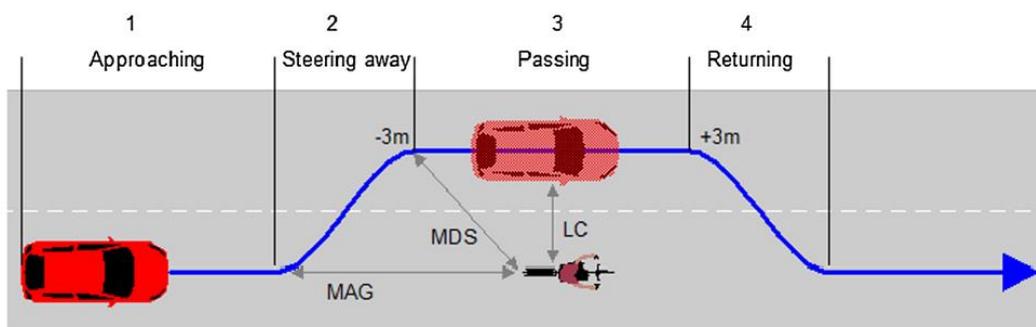


Figura 8. Fases del adelantamiento a ciclistas y distancias al ciclista consideradas por Kovaceva et al. (2019).

2.3.1.3 Bicicleta instrumentada

En la revisión de los estudios realizados se han visto diferentes instrumentaciones de bicicletas con el fin de recolectar datos de maniobras de adelantamiento. Actualmente los dispositivos han evolucionado hacia un menor tamaño y una mayor eficiencia y calidad en los datos proporcionados. Esta metodología permite obtener datos de cada maniobra de una manera directa, sincronizando los datos obtenidos por los diferentes dispositivos utilizados. Además, permite registrar un elevado número de maniobras realizadas por diferentes tipos de vehículos.

En este apartado se resumen las investigaciones más recientes que han utilizado esta metodología.

Chapman and Noyce (2012) obtuvieron datos de separaciones laterales entre el vehículo adelantante y la bicicleta en varias carreteras del estado de Wisconsin (USA). La instrumentación de la bicicleta consistió en dos cámaras de vídeo situadas en la parte delantera y trasera, un GPS que proporcionó datos de velocidad y posición del ciclista y un distanciómetro que registró datos de separaciones. Para registrar y almacenar los datos se dispuso de un ordenador en la parte trasera de la bicicleta. Se obtuvieron datos de 1,151 maniobras de adelantamiento, 789 de ellas se registraron en tramos de carretera con carril bici o arcén pavimentado, mientras que las 362 restantes se registraron en carretera sin estas instalaciones. Para cada maniobra se registraron los siguientes datos:

- Localización de la maniobra (ubicación y dirección del desplazamiento) y meteorología.
- Tipo de vía (arcenes), señalización horizontal y vertical.
- Posición y velocidad de la bicicleta (desde GPS).
- Tipo de vehículo adelantante y posición en el carril.
- Distancia lateral entre vehículo adelantante y bicicleta.
- Presencia de vehículo opuesto.

Los resultados presentaron una separación lateral media ligeramente menor para las carreteras sin carril para bicicletas (6.3 pies frente 6.4 pies). Sólo seis maniobras incumplieron la separación lateral mínima exigida en Wisconsin de 3 pies. El porcentaje de invasión del carril opuesto fue menor para tramos con carril bici o arcén pavimentado.

Seguidamente, Chuang et al. (2013) utilizó una bicicleta instrumentada para investigar cómo factores relacionados con los vehículos motorizados, con la vía y con los ciclistas influyeron en las decisiones de los conductores sobre las distancias durante el adelantamiento y en el comportamiento de los ciclistas después de que los conductores iniciaran la maniobra. En el estudio participaron 34 ciclistas, y se registraron 1,380 maniobras de adelantamiento. El tramo de estudio tenía una longitud de 5.5 km y transcurría por una zona urbana. En el estudio se describen los dispositivos utilizados, su alcance y las variables que pueden medir detalladamente. Los factores registrados fueron el tipo de vehículo adelantante, la duración del adelantamiento, el estado del pavimento, el tipo de separación de carriles, el género del ciclista, el ángulo de la rueda de la bicicleta y su velocidad, y las distancias entre vehículo y bicicleta durante el adelantamiento. Los resultados obtenidos indicaron que las separaciones iniciales y las distancias laterales eran menores para motocicletas que para el resto de vehículos motorizados, los autobuses generaron una menor estabilidad de los ciclistas al adelantarles. Además, una mayor duración del adelantamiento provocó que los ciclistas mostraran comportamientos de conducción cautelosos pero menos estables. Para factores relacionados con la carretera, la existencia de líneas continuas ayudó a mantener una mayor distancia lateral entre conductores y ciclistas, además, el ángulo y la variación de velocidad de los ciclistas afectaron la distancia de adelantamiento inicial de los conductores. Este estudio demostró que el método recolección de datos mediante bicicletas instrumentadas es capaz de recopilar datos válidos con respecto a los comportamientos de los ciclistas, que potencialmente podrían utilizarse en varios tipos de estudios. Sin embargo, este método requiere una muestra grande y un tiempo y esfuerzo considerables para el procesamiento de datos.

En el año 2016, Chapman R, (2016) utilizó una bicicleta instrumentada para obtener datos de maniobras de adelantamiento entre vehículos motorizados y ciclistas en carreteras convencionales en Wisconsin (USA). En total registraron 1,151 maniobras de adelantamiento, de las cuales solamente el 0.5% de los casos fueron eventos con separaciones reducidas. El objetivo de este trabajo fue para evaluar las distancias laterales entre vehículos y bicicletas durante maniobras de adelantamiento en carreteras convencionales. Los resultados indicaron que los conductores, independientemente de la presencia de un carril para bicicletas, proporcionan más del doble del espacio libre mínimo requerido por la ley. La existencia un carril para bicicletas en una carretera convencional parece reducir la probabilidad de que un vehículo invada el sentido opuesto (cruzando una línea central continua) en más del 50%. Los resultados muestran que un arcén pavimentado resultaría una contramedida de seguridad eficaz.

Las bicicletas instrumentadas también fueron utilizadas por Dozza and Werneke (2014) para recoger datos en la zona urbana y periurbana de Göteborg (Sweden). En su estudio

instrumentaron cinco bicicletas con luces, timbre y reflectantes tal y como exige la legislación sueca. También dispusieron de una cámara de vídeo frontal, GSP, sensores de fuerza de frenado y un botón en el manillar para indicar las situaciones percibidas como peligrosas. Estas bicicletas fueron conducidas por 16 ciclistas circulando individualmente. Después del visionado de los vídeos y de la sincronización de todos los datos se identificaron 63 eventos marcados como críticos por los ciclistas participantes en las pruebas mediante el pulsador, mediante entrevistas o mediante los resultados de las mediciones. Los resultados mostraron que un 30% de los incidentes registrados correspondieron con interacciones con vehículos motorizados, un 29% con peatones y un 16% con otros ciclistas. Los autores corroboraron esta metodología de toma de datos como válida para la detección de eventos críticos para los ciclistas.

Posteriormente, Dozza et al. (2016) analizaron en profundidad la maniobra de adelantamiento realizada por vehículos motorizados a un ciclista que circulaba utilizando una bicicleta instrumentada en carreteras convencionales de Sweden. Para ello instrumentaron una bicicleta eléctrica con un dispositivo LIDAR, un GPS y una video cámara frontal y otra trasera. Se analizaron un total de 145 maniobras de adelantamiento, en las que se identificaron el tipo de vehículo adelantante, el tipo de estrategia de adelantamiento (lanzado o en seguimiento), la presencia de tráfico opuesto, el tipo de línea central y variables geométricas del segmento de carretera. En esta investigación se identificaron tres tipos de estrategias de adelantamiento: lanzado, en seguimiento y en grupo/cola; así como cuatro fases de la maniobra mostradas en la Figura 9: aproximación, inicio, adelantamiento y retorno. El adelantamiento comienza cuando el vehículo motorizado alcanza a la bicicleta por detrás mediante la fase de aproximación. Cuando el conductor comienza a cambiar su trayectoria para no colisionar con el ciclista la fase de aproximación finaliza y comienza la fase de inicio de la maniobra. En el momento en que el conductor entra en la zona de adelantamiento (área de alrededor de 5,7 m de largo, que se extiende desde 2 m detrás de la bicicleta hasta 2 m delante de la bicicleta) la fase de inicio finaliza y comienza la fase de adelantamiento. Finalmente, el conductor abandona la zona de adelantamiento, finalizando la fase de adelantamiento e iniciando la fase de retorno. La fase de retorno finaliza una vez que el vehículo vuelve a la misma posición en el carril que tenía antes de la maniobra de adelantamiento.

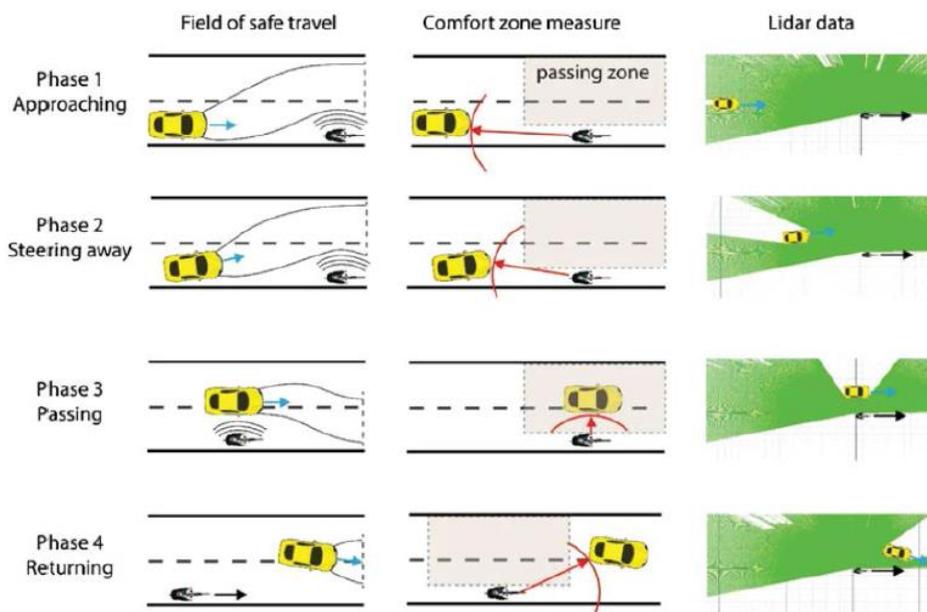


Figura 9. Fases de la maniobra de adelantamiento identificadas por Dozza et al. (2016).

Los principales resultados de Dozza et al. (2016) fueron la línea temporal de las fases del adelantamiento descritas y la duración de cada una de ellas. También se identificaron las zonas de confort del conductor en cada una de las fases del adelantamiento. Concluyeron que las maniobras en seguimiento ofrecían mayores duraciones y separaciones laterales que las lanzadas, y que la presencia de un vehículo opuesto durante el adelantamiento redujo la separación lateral entre el adelantante y el ciclista en todas las fases de la maniobra, siendo el factor con una mayor influencia en la maniobra. La velocidad del adelantante, el ancho de carril y arcén y la velocidad límite sin embargo no afectaron significativamente la zona de confort del conductor o la dinámica del adelantamiento.

Llorca et al. (2017) analizaron la maniobra de adelantamiento a ciclistas en carreteras convencionales valencianas utilizando dos bicicletas instrumentadas que recorrieron siete tramos de carretera con diferentes características geométricas y de tráfico. La instrumentación de la bicicleta se muestra en la Figura 10 y consistió en tres cámaras de vídeo que registraron toda la maniobra de adelantamiento, dos distanciómetros, un velocímetro láser, un puntero láser que sirvió para guiar al ciclista en cuanto a su posición en la calzada, y los sistemas necesarios de alimentación y de almacenamiento de datos. La posición de la bicicleta se fijó en el centro del arcén, o lo más cerca posible del extremo derecho de la calzada.



Figura 10. Bicicleta instrumentada utilizada por Llorca et al. (2017).

En el estudio se registraron 2,928 maniobras de adelantamiento, y al finalizar las sesiones se registró el nivel de riesgo percibido por el ciclista respecto a cada tramo de carretera recorrido. Para cada maniobra se registraron datos de separación lateral, velocidad del adelantante, tipo de vehículo adelantante, invasión del sentido opuesto, duración de la ocupación del sentido opuesto, existencia de tráfico opuesto y velocidad de la bicicleta. Se calcularon varias relaciones entre la separación lateral, la velocidad del adelantante y su tipología para relacionar la afección de las fuerzas aerodinámicas sobre el ciclista con la percepción de riesgo. Los resultados indicaron que en un 36% de los casos no se cumplió la separación lateral mínima exigida de 1.5 m. También se comprobó que la separación lateral no es el único factor que afecta la percepción de riesgo de los ciclistas, de hecho, el riesgo percibido por los ciclistas se ve afectado por la combinación entre separación lateral, velocidad y tipo de vehículo, lo que es proporcional a las fuerzas aerodinámicas ejercidas entre el vehículo y la bicicleta.

En Victoria (Australia), Beck et al. (2019) realizaron un estudio en el que instrumentaron con un dispositivo que midió la separación lateral durante el adelantamiento a 60 bicicletas, registrando un total de 18,527 maniobras de adelantamiento. Este estudio tuvo como objetivo cuantificar la

distancia lateral y evaluar el impacto de las características de los vehículos de motor y de la infraestructura vial en esta distancia. la distancia lateral mediana fue de 173 cm, y en un 5.9% se registraron separaciones menores a 1 m. Se registraron menores separaciones para vehículos de mayores dimensiones. En vías sin carriles bici segregados y con coches aparcados se registraron separaciones menores.

Garcia et al. (2020) llevaron a cabo un estudio en el que instrumentaron tres bicicletas que circularon por un tramo de carretera convencional de 7.7 km de longitud, con un ancho de carril de 3.5 m y de arcén de 1.5 m y con una velocidad límite de 100 km/h situado en Valencia (España). Los ciclistas recorrieron el tramo en cinco configuraciones diferentes del grupo de ciclistas: individualmente, dos en línea, dos en paralelo, tres en línea y 1+2. Se observaron y caracterizaron adelantamientos de vehículos motorizados a partir de cámaras de video instaladas en las bicicletas. La velocidad y la distancia se midieron gracias a dispositivos láser situados a bordo. Además, se registró la percepción subjetiva del riesgo de cada ciclista en cada evento de adelantamiento. Se registraron menores separaciones cuando los ciclistas circulaban en línea frente a en paralelo. En cuanto a la velocidad, se registraron mayores velocidades cuando circulaba un ciclista individualmente que cuando lo hacía en grupo. Los resultados identificaron que las maniobras marcadas con un nivel más elevado de riesgo estaban relacionadas con menores separaciones laterales y elevadas velocidades de los vehículos. La combinación de separación lateral, velocidad y tamaño del vehículo adelantante, en forma de fuerzas aerodinámicas, presentó una mayor correlación con el nivel de riesgo percibido por los ciclistas que al considerar estos factores por separado (Figura 11).

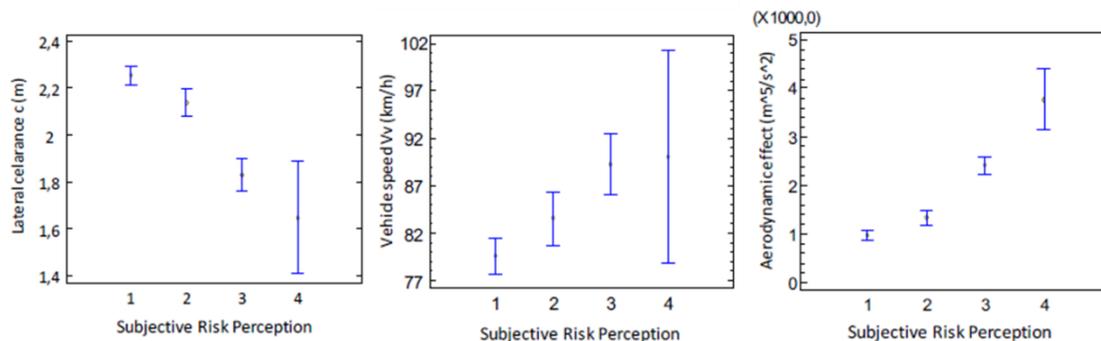


Figura 11. Riesgo subjetivo percibido por los ciclistas según separación lateral, velocidad del adelantante y fuerza aerodinámica durante los adelantamientos (Garcia et al., 2020).

Fraser and Meuleners (2020a, 2020b) realizaron dos estudios publicados en el año 2020 sobre eventos no seguros entre vehículos motorizados y grupos de ciclistas en Australia. Se equiparon con vídeo cámaras 60 bicicletas que circularon en 40 grupos de ciclistas diferentes, los grupos de ciclistas estaban compuestos por al menos cinco ciclistas, los cuales realizaron sus recorridos habituales. Después de analizar los vídeos se identificaron 108 eventos no seguros relacionados con accidentes, casi accidentes y eventos con separaciones laterales reducidas. El tipo de evento no seguro más común correspondió con un motorizado adelantando al grupo (65.7%), en el 39.4% de los adelantamientos no seguros la presencia de infraestructura vial más adelante (glorieta, isla de tráfico) impidió pasar de manera segura y dio lugar a un evento inseguro. Los conductores tuvieron la culpa del 83,3% de todos los eventos inseguros, y se observaron comportamientos imprudentes de los conductores en el 13,3% de estos eventos. Por otra parte, se determinaron los factores de riesgo asociados con eventos inseguros, concluyendo que las glorietas aumentaron el riesgo de un evento inseguro en comparación con tramos de carretera

e intersecciones. Las isletas de tráfico elevadas, los límites de velocidad ≥ 60 km/h y las infracciones de tráfico en grupo también aumentaron significativamente el riesgo de un evento inseguro. Circular dos en paralelo o todos los ciclistas por el arcén redujo significativamente el riesgo de un evento inseguro, en comparación con la circulación del grupo en línea.

Recientemente, Beck et al. (2021) exploraron la relación entre el riesgo subjetivo experimentado por los ciclistas y la distancia lateral de adelantamiento de los vehículos de motor mediante el uso de bicicletas instrumentadas en Victoria (Australia). Los participantes tenían un dispositivo instalado en su bicicleta que midió la distancia de paso lateral de los vehículos de motor y un botón en el manillar que los participantes podían presionar cuando sentían que un adelantamiento se realizaba demasiado cerca o era inseguro. Se registraron 217 eventos en los que se pulsó el botón (1,2% de todos los adelantamientos) de un total de 60 participantes. El 10.4% de los adelantamientos con una separación lateral inferior a 1 m fueron marcados como no seguros por los ciclistas. Las probabilidades de presionar el botón fueron tres veces más altas cuando el vehículo adelantante fue un camión. Se marcaron más eventos no seguros en entornos viales sin carril bici y sin coches aparcados, coincidiendo con entornos interurbanos.

Esta metodología de toma de datos también fue utilizada por Feizi et al. (2021), quienes instrumentaron una bicicleta con vídeo cámaras y un dispositivo ultrasónico de medición de distancia para analizar el efecto de diferentes leyes de distancia mínima de adelantamiento aprobadas en varios estados de los Estados Unidos sobre la separación lateral durante el adelantamiento. En concreto se evaluaron adelantamientos realizados según tres leyes de distancias mínimas: sin distancia mínima, 3 pies y cinco pies. Se registraron 2,838 maniobras en carreteras con dos y tres carriles de circulación. Los resultados demostraron que las distancias de adelantamiento de los conductores eran significativamente mayores en lugares con la ley de cinco pies que en otras áreas. El estudio también encontró que las carreteras con arcenes pavimentados, carriles de circulación más anchos y un mayor número de carriles contribuyeron a mayores distancias de adelantamiento. Por el contrario, encontraron que la distancia de adelantamiento era menor en las carreteras con marcas de carril compartidas o una mayor proporción de vehículos pesados. Además, una encuesta se llevó a cabo en lugares con diferentes leyes y ordenanzas para determinar la concienciación de los conductores y el efecto de tales políticas en el comportamiento de los conductores. El estudio ilustró que casi el 70% de los conductores en áreas con una ley aprobada no conocían ninguna ley existente que requiera que los conductores mantengan una separación mínima con los ciclistas.

Finalmente, en un estudio realizado en Australia, Mackenzie et al. (2021) instalaron un dispositivo de medición de distancia lateral durante el adelantamiento en las bicicletas de 23 ciclistas voluntarios que participaron en el experimento. Se identificaron 10,959 maniobras de adelantamiento en las carreteras con velocidad límite superior a 60 km/h de las cuales 1349 (12,3%) no cumplían la separación mínima exigida. En carreteras con límite de velocidad de 60 km/h o menor hubo 5,517 adelantamientos de los cuales 153 (2.8%) no cumplieron la separación mínima. Los resultados mostraron que las diferencias en la distancia de adelantamiento y el incumplimiento de la distancia mínima se asociaron con la clasificación de las carreteras, la presencia de carriles para bicicletas y el límite de velocidad. En general, las distancias laterales fueron mayores en las carreteras con una clasificación (jerarquía) más baja y también en las carreteras con límites de velocidad más altos. Una excepción a esto fueron las carreteras con un límite de velocidad de 50 km/h donde las distancias eran menores en comparación con las carreteras con un límite de velocidad de 60 km/h. Los carriles para bicicletas se asociaron generalmente con un aumento en la distancia del adelantamiento, excepto en carreteras

clasificadas como "troncales", donde un carril para bicicletas resultó en adelantamientos con menor separación. Esto sugiere que, en las carreteras principales, que se supone que tienen una gran cantidad de tráfico, los carriles para bicicletas pueden ser insuficiente para ofrecer protección a los ciclistas y pueden ser necesarias medidas adicionales.

2.3.1.4 Encuestas sobre comportamiento y percepción

Otra metodología para recopilar información sobre el comportamiento y la percepción de los conductores de bicicletas y vehículos motorizados en su interacción son las encuestas. A partir de ellas se deducen preferencias y percepciones que pueden utilizarse para comprender mejor el fenómeno.

Esta metodología fue utilizada por Johnson et al. (2014), quienes encuestaron a 1,984 conductores australianos de los cuales una parte también eran ciclistas. Los ciclistas-conductores informaron de comportamientos más seguros relacionados con compartir las carreteras con ciclistas y conocían mejor las normas viales relacionadas con la infraestructura para bicicletas que los conductores; sin embargo, el conocimiento de las normas viales relacionadas con los carriles para bicicletas fue bajo para ambos grupos. Los conductores tenían más probabilidades que los ciclistas-conductores de tener actitudes negativas hacia los ciclistas.

Posteriormente, Heesch et al. (2017) analizaron la percepción de los ciclistas antes y después de la aprobación de la normativa que exige una separación mínima durante el adelantamiento en Queensland (Australia) mediante una encuesta realizada a 1,758 ciclistas antes de la normativa y a 1,997 después de la normativa. En ambos períodos de tiempo, los tipos de acoso más denunciados por los ciclistas fueron conducir demasiado cerca de manera deliberada (causando miedo o ansiedad), gritar y hacer gestos obscenos o participar en acoso sexual. El porcentaje de ciclistas que informaron de separaciones reducidas por parte de conductores aumentó ligeramente entre 2009 y 2015.

Haworth et al. (2018a) realizaron una encuesta a 3,769 conductores en Queensland (Australia) un año después de la entrada en vigor de la normativa de separación mínima requerida con el fin de evaluar el cumplimiento con y actitudes hacia esta normativa. Un 35.5% de los conductores informó de que no cumplían con la norma vial "la mayor parte del tiempo" o "casi siempre" en zonas con velocidad límite ≤ 60 km/h, mientras que en zonas con velocidad límite > 60 km/h el porcentaje de conductores que indicaron no cumplimiento fue del 31.8%. El incumplimiento se relacionó más con factores de actitud que demográficos. Entre los que informaron frecuentes incumplimientos, la normativa pareció influir en sus actitudes hacia los ciclistas negativamente.

Recientemente, López et al. (2019) realizaron una encuesta a 523 ciclistas deportivos que utilizaban habitualmente carreteras convencionales españolas. El propósito de la encuesta fue investigar los efectos provocados por la presencia de ciclistas en las carreteras, tanto de forma individual como grupal. La distancia lateral de 1.5 m fue percibida por el 72.1% de los ciclistas como suficiente. Respecto a la mejora de la carretera, la mayoría de ciclistas, individualmente o en grupo, marcaron el arcén con mayor anchura como la mejor medida para mejorar la convivencia de ciclistas y conductores. Las carreteras convencionales con un carril lateral independiente fue el diseño de vía preferido por los ciclistas desde el punto de vista de la seguridad.

2.3.1.5 Microsimulación del tráfico

En la actualidad existen varios estudios que consideran el tráfico ciclista y utilizan modelos de microsimulación del tráfico, sin embargo, la gran mayoría de ellos están enfocados al ámbito urbano, y solamente simulan tráfico ciclista sin considerar las interacciones con el motorizado, o en todo caso, analizando los conflictos entre ciclistas y conductores en intersecciones. A continuación, se describen algunos de los estudio más recientes que han incorporado ciclistas a los modelos de microsimulación de tráfico.

En el año 2013, Robertson and Hawkins (2013) utilizaron el microsimulador de tráfico VSSIM 5.10 para analizar la operación del tráfico en vías urbanas de cuatro carriles compartidas por ciclistas y motorizados. Este artículo utiliza modelos de microsimulación y un análisis de sensibilidad para evaluar la calidad del servicio de vehículos motorizados y de bicicletas. Usando los resultados del análisis de sensibilidad y comparación, se proporciona orientación sobre la implementación en carreteras compartidas. Los resultados indican que el ancho del carril exterior y el volumen de bicicletas afectan la calidad de servicio de motorizados en estas vías. Además, valores más altos para puntos de acceso no señalizados por kilómetro, el porcentaje de vehículos pesados y la distancia de cruce de intersección señalizada dan como resultado que la calidad del servicio de la bicicleta sea menor que la calidad del servicio del automóvil. Se proporciona una guía de implementación de carreteras compartidas para cuatro carriles divididos segmentos de calles urbanas, aunque es necesario calibrar los modelos de microsimulación con datos observados.

Durante un estudio realizado en 2016, Quispe Cahyña (2016) modelizó el comportamiento de ciclistas en VISSIM 8 considerando la circulación solamente de ciclistas en una avenida urbana de la ciudad de Lima en Perú, los resultados indicaron que es posible obtener resultados similares a los observados utilizando los modelos desarrollados para vehículos motorizados, sin embargo, es necesario incorporar modelos de seguimiento que sean específicos para ciclistas que reflejen sus movimientos particulares por estas vías urbanas, ya que los ciclistas realizan más movimientos individuales y responden ante otro tipo de estímulos y condiciones.

Posteriormente, AlRajie and Ismail (2016) realizaron un estudio de conflictos de tráfico en el que incorporaron ciclistas y vehículos motorizados en una intersección urbana utilizando el microsimulador de tráfico VISSIM. Los resultados obtenidos mostraron que las predicciones de conflictos mejoraban al calibrar el modelo con observaciones, obteniendo mayores correlaciones entre los conflictos reales y los simulados. Al mismo tiempo se concluyó que la precisión de la predicción de VISSIM disminuye a medida que aumenta el volumen de los ciclistas o el producto del volumen de los ciclistas y el volumen de los vehículos.

Unos años más tarde, Ziemke et al. (2019) modelizaron el comportamiento de ciclistas basado en agentes en el marco de simulación MATSim, incorporando sus principales características. Los autores desarrollaron un modelo utilizado en entorno urbano. Los cálculos de velocidad de viaje, la puntuación del plan y el enrutamiento se mejoraron para tener en cuenta atributos de la infraestructura como el pavimento o la pendiente. Además, la puntuación, es decir, la evaluación de planes de viaje diarios simulados, se mejoró para tener en cuenta los eventos de tráfico que surgen en la simulación como los adelantamientos de automóviles, y que tienen un impacto adicional en las decisiones de los ciclistas. Se implementó un enrutador aleatorio para permitir a los ciclistas encontrar rutas realistas basadas en todos estos factores.

La microsimulación del tráfico ciclista también fue utilizada por Aldred et al. (2019), quienes realizaron un estudio en el que modelaron las interacciones entre el autobús y los ciclistas en

una calle urbana de London, evaluando las demoras en los autobuses causadas por altos volúmenes de ciclistas en carriles bus. El modelo desarrollado demuestra que las bicicletas pueden causar retrasos significativos a los autobuses en carriles compartidos, cuando se registran elevados volúmenes ciclistas. Por tanto, los beneficios del tiempo de viaje en autobús pueden derivarse de la separación de las bicicletas de los autobuses, donde los flujos donde los flujos de bicicletas sean altos. El estudio también sugiere que el software de modelado de microsimulación, como se usa típicamente, resulta problemático para representar a los ciclistas.

Bahmankhah et al. (2019) evaluaron de manera integrada el desempeño del tráfico, las emisiones contaminantes y los conflictos viales entre bicicletas y vehículos motorizados en una intersección señalizada. Los datos de tráfico se recopilaron a partir de un Intersección señalizada en Aveiro (Portugal) Se examinaron dos escenarios, el primero consideró la sustitución de vehículos motorizados dentro de la señal de tráfico de ciclo fijo, el segundo consistió en reemplazar el control de tráfico existente por una rotonda convencional de dos carriles. Para cada escenario, la demanda de bicicletas se varió de 9 a 270 bicicletas por hora. El modelo de tráfico microscópico (VISSIM) emparejado con uno de emisiones (Específico del vehículo Power-VSP) y el modelo de seguridad (Subrogate Safety Assessment Methodology-SSAM) se utilizaron para evaluar operaciones específicas de la intersección. Los resultados mostraron que la rotonda de dos carriles superó el control de tráfico existente reduciendo el número de paradas, el tiempo de viaje y las emisiones. También se encontró que el número de conflictos se redujo significativamente. Sin embargo, el diseño de la rotonda conduce a más conflictos severos y choques potenciales.

Recientemente, Mohammed et al. (2021) realizaron un estudio de modelización del comportamiento de ciclistas mediante microsimulación basado en datos observados en una ruta unidireccional de uso exclusivo de ciclistas en Vancouver (Canadá). Se propone un método de simulación de bicicletas basado en agentes en el que se utiliza el aprendizaje generativo de imitación adversarial (GAIL) para inferir las intenciones inciertas y las preferencias heterogéneas de los ciclistas a partir de datos observados. El enfoque propuesto para la microsimulación basada en agentes es un avance significativo, con una representación continua, no lineal y estocástica de los estados, decisiones y acciones de los ciclistas. Se sugiere mayor consideración de la diversidad de los ciclistas, necesaria para desarrollar redes de bicicletas para todas las edades y habilidades de los ciclistas.

Otro estudio que utilizó la microsimulación del tráfico fue el realizado por Grigoropoulos et al. (2021), quienes analizaron el efecto de la inclusión de una vía para ciclistas en un entorno urbano sobre las funcionalidad del tráfico ciclista y sobre el resto de usuarios utilizando el microsimulador de tráfico SUMO. El estudio consideró una posible ruta piloto en el centro de la ciudad de Múnich, donde actualmente existe una infraestructura para ciclistas que pretende ser actualizada a una autovía para bicicletas. Se diseñó modelo de simulación utilizando datos de tráfico de observaciones de campo y estimaciones futuras para la composición del tráfico. Mediante microsimulación del tráfico se determinaron los efectos potenciales de la infraestructura, considerando diferentes escenarios de estudio variando el número de carriles y sentidos del carril bici, las estrategias de control del tráfico y la composición del tráfico ciclista (bicicletas normales, eléctricas y de carga). Se evaluó el nivel de servicio de los ciclistas mediante el análisis de velocidad media de recorrido, de la demora, del tiempo de espera, del número de paradas y del tiempo de recorrido. También se evaluó la aficción sobre el nivel de servicio de los motorizados, aunque no interaccionaron directamente con las bicicletas, si no que se vieron afectados por variaciones de dimensiones de la vía y de gestión en la señalización del tráfico.

2.3.1.6 Simulador de conducción

Recientemente, y debido a la evolución que han presentados los simuladores de tráfico en los últimos años, este método de obtención de datos ha sido utilizado en numerosos estudios.

Los simuladores de tráfico permiten obtener datos desde la perspectiva del conductor, y aunque requieren una elevada carga de trabajo a nivel computacional para desarrollar el modelo en el simulador, las tomas de datos con los participantes del estudio son relativamente rápidas y económicas.

Bella and Silvestri (2017) emplearon un simulador de tráfico para simular escenarios variando la sección transversal y la alineación horizontal y analizar su efecto en las interacciones entre conductores y ciclistas. La sección transversal disponía de un ancho total de 9 m en todos los casos, se diseñaron tres versiones de sección transversal variando el ancho del carril y arcén, siendo el primero con un ancho de carril de 3.5 m y de arcén de 1 m, el segundo con un ancho de carril de 3.0 m y de arcén de 1.5 m, y en el tercero con un ancho de carril de 2.75 m y de arcén de 1.75 m. En los escenarios segundo y tercero el arcén se separó del carril con una línea amarilla. Estas tres secciones transversales simuladas se muestran en la Figura 12.



Figura 12. Secciones transversales simuladas por Bella and Silvestri (2017).

Además, se dispuso de una alineación en planta en la que se encontraron los participantes del estudio con ciclistas en dos tramos rectos, de 450 m y 650 m, y en dos curvas a derecha e izquierda con radios de 200 m. Las velocidades de los ciclistas estaban fijadas en 20 km/h y sus posiciones a 0.75 m del borde derecho en todos los casos. En las simulaciones se incorporó tráfico opuesto con el fin de que los participantes estuvieran más atentos y no invadiesen el carril opuesto excesivamente, sin embargo, durante los adelantamientos no existió tráfico opuesto visible. En el experimento participaron 40 conductores que realizaron tres sesiones, una por cada sección transversal diseñada. Los resultados obtenidos fueron los perfiles de velocidad y de posición lateral durante las maniobras de adelantamiento. Las principales conclusiones obtenidas pusieron de manifiesto que la geometría del tramo influye en la maniobra de adelantamiento, registrándose menores separaciones laterales en tramos rectos que en curvas, mientras que en curvas a izquierda la separación lateral fue mayor. En cuanto a la sección transversal, se obtuvieron mayores separaciones laterales para arcenes más anchos.

Posteriormente, Bianchi Piccinini et al. (2018) analizaron la influencia del tráfico opuesto en el adelantamiento a ciclistas mediante el uso de un simulador de tráfico. En el simulador incorporaron una carretera convencional similar a la observada por Dozza et al. (2016). Analizaron cómo el tiempo hasta la colisión entre el tráfico opuesto y el vehículo adelantante influyó en la estrategia de adelantamiento y en los márgenes mínimos de seguridad hacia el ciclista adelantado. Los resultados mostraron que una disminución significativa en el tiempo de colisión contra el vehículo opuesto afecta la estrategia de adelantamiento de los conductores, induciendo a realizar más adelantamientos en seguimiento. La disminución del tiempo hasta la colisión también produce una disminución de los márgenes mínimos de seguridad para los ciclistas, sobre todo en maniobras lanzadas. Se registraron menores separaciones laterales y

mayores velocidades durante el adelantamiento en maniobras lanzadas que en las que se realizó un seguimiento previo de los ciclistas.

En el año 2019, Farah et al. (2019) utilizaron los mismos datos para desarrollar modelos predictivos del tipo de estrategia elegida por los conductores y la separación lateral durante el adelantamiento a ciclistas en una carretera convencional. En el estudio participaron 37 conductores que realizaron un total de 259 maniobras de adelantamiento, de las cuales 168 fueron lanzadas y 91 en seguimiento. Los resultados indicaron que la velocidad del adelantante afectó a la estrategia de adelantamiento, mientras que la distancia lateral de confort se ve afectada principalmente por la distancia longitudinal entre el vehículo adelantante y el vehículo que opuesto, la distancia longitudinal entre el vehículo adelantante y el ciclista, y la presencia de un vehículo opuesto, así como por las características de los conductores.

El impacto de las actitudes implícitas y explícitas en el comportamiento de los conductores en interacciones con ciclistas fue analizado por Goddard et al. (2020). Para ello utilizaron un simulador de conducción mediante el cual recogieron varias medidas objetivas de seguridad en un escenario de adelantamiento a un ciclista. Este estudio examinó no solo la distancia, sino también la duración y la velocidad durante los adelantamientos. Las actitudes de los participantes sobre la conducción y sobre los ciclistas se recopilaron a través de una encuesta, junto con una prueba en línea de actitudes subconscientes, desarrollada para examinar la preferencia entre conductores y ciclistas. Los resultados indicaron que las actitudes conscientes afectan la rapidez y la distancia con la que los conductores adelantan a los ciclistas. Participantes con actitudes negativas sobre los ciclistas como grupo legítimo de usuarios de la carretera pasó significativamente más rápido, mientras que la gente con inquietudes acerca de su conocimiento o juicio sobre adelantar a un ciclista, adelantaron a menores velocidades. La autoidentificación de los conductores como ciclistas predijo velocidades de adelantamiento más altas, mientras que los encuestados que circulaban en bicicleta semanalmente adelantaron más cerca, pero con menor velocidad. Los comportamientos no difirieron significativamente en función de la medida de actitudes implícitas.

Mecheri et al. (2020) también utilizaron un simulador de conducción para analizar el efecto de la configuración de la carretera en el comportamiento de los conductores al adelantar a ciclistas teniendo en cuenta la distancia entre la línea central de la vía y el ciclista (espacio de viaje del conductor). Para ello desarrollaron un escenario en el simulador de tráfico consistente en una carretera convencional recta donde se variaron el ancho del carril, el ancho del arcén y la posición del ciclista. Los resultados mostraron que las variaciones en el espacio de viaje del conductor provocado por diferentes anchos de carril y posiciones del ciclista tuvo un impacto significativo en la separación lateral. Sin embargo, la variación del ancho del arcén en condiciones de sección constante no influyó las interacciones entre el conductor y el ciclista. Finalmente, manipular la configuración de la carretera en un espacio de recorrido fijo y el ancho de la vía tuvieron un impacto en la separación lateral, sin afectar la velocidad o la frecuencia de las invasiones de la línea central.

Recientemente, Rossi et al. (2021) realizaron un estudio de la maniobra de adelantamiento a un ciclista utilizando un simulador de tráfico en el que investigaron la influencia de un programa de entrenamiento a bordo en tiempo real. En el estudio participaron 67 conductores, los cuales realizaron dos pruebas, en la primera, los participantes condujeron con la mayor normalidad posible. sin recibir ningún tipo de retroalimentación, mientras que en la segunda recibieron comentarios basados en su comportamiento de conducción. Los participantes se clasificaron según su estilo de conducción en agresivos y defensivos, y la retroalimentación ofrecida se

clasificó en positiva y negativa, presentándose mediante señales auditivas o visuales. Los resultados mostraron que los programas de coaching tuvieron un efecto positivo significativo, en términos de seguridad, reduciendo la aceleración y las velocidades durante los adelantamientos e induciendo a los conductores a adoptar la estrategia en seguimiento más segura. También fue particularmente eficaz para mejorar el rendimiento de conductores agresivos.

2.3.1.7 Realidad virtual

Esta metodología de toma de datos es la que ha sido desarrollada más recientemente. Consiste en el uso de gafas de realidad virtual o de pantallas de imagen envolventes que crean un entorno inmersivo donde el participante del experimento participa en la experiencia de manera más realista.

En un estudio realizado por Nazemi et al. (2021) se analizó la percepción del nivel de seguridad percibido por los ciclistas combinando un simulador de tráfico con realidad virtual inmersiva. En el estudio participaron 150 ciclistas, que recorrieron cinco entornos diferentes con una bicicleta instrumental en realidad virtual. A los participantes se les preguntó por datos demográficos y por percepciones y preferencias después de realizar las pruebas. Los resultados revelaron cómo cada entorno y ambiente de volumen de peatones/tráfico afectó al nivel percibido de seguridad y a la disposición de circular en bicicleta. Los participantes se sentían más seguros al circular en bicicleta por el carril bici segregado en comparación con circular en bicicleta por el carril bici pintado en la carretera o por el borde de la carretera.

Pérez-Zuriaga et al. (2021) utilizaron la realidad virtual combinada con encuestas para realizar un estudio de la percepción subjetiva de riesgo (PSR) de los ciclistas ante determinadas configuraciones de la infraestructura en entornos interurbanos de la provincia de València. Se realizaron grabaciones desde una bicicleta con una cámara 360º utilizando un estabilizador de grabación, y se editaron los vídeos de 10 tramos de carretera convencional en los que había diferentes infraestructuras ciclistas. 26 ciclistas participaron en el estudio realizando los recorridos sobre una bicicleta sobre un rodillo de entrenamiento utilizando las gafas de realidad virtual y un vídeo wall. Los ciclistas manifestaron su PSR para cada uno de los elementos que componían los diferentes tramos de carretera durante las pruebas, valorando el riesgo de 1 a 5. Se identificó un mayor nivel de PSR en el caso de los carriles bici segregados debido a la falta de mantenimiento de la infraestructura, la falta de señalización y el inadecuado diseño de las entradas y salidas del carril bici. Mientras que, en el caso de los recorridos realizados por la calzada, los elementos que aumentan el riesgo según los ciclistas fueron una anchura reducida de los arcones, especialmente si estos son coloreados, el estado del pavimento del arcén, las barreras de seguridad metálicas y el diseño de los márgenes. El mayor riesgo percibido por los ciclistas estuvo relacionado con el comportamiento de los conductores de vehículos motorizados.

2.3.1.8 Pruebas en circuito cerrado

Otra metodología para la obtención de datos de interacciones entre vehículos motorizados y ciclistas es el uso de circuitos cerrados. En este aspecto, Rasch et al. (2020) realizaron un estudio para evaluar cómo influye el tráfico opuesto y la posición del ciclista en el carril sobre la maniobra de adelantamiento. Para ello realizaron un experimento en un circuito cerrado en el que utilizaron un robot que hacía de vehículo opuesto y un maniquí sobre una bicicleta situada en una plataforma con movimiento que hacía de ciclista (Figura 13). En el estudio se consideraron dos posiciones del ciclista en el carril. Al mismo tiempo, el vehículo opuesto robotizado se controló para que se presentase en la trayectoria del vehículo adelantante con

tiempos de colisión de 6 y 9 s. Participaron 18 conductores en el estudio, los cuales realizaron seis pruebas diferentes variando las condiciones del estudio. Se analizaron varias medidas de seguridad considerando las cuatro fases del adelantamiento.



Figura 13. Experimento en circuito cerrado realizado por Rasch et al. (2020).

Se observó que generalmente las maniobras lanzadas fueron más prevalentes que las de seguimiento, sobre todo para huecos con el opuesto mayores, mientras que para huecos reducidos las maniobras en seguimiento fueron más comunes. Los resultados obtenidos indicaron que las distancias de seguridad relativas a todas las colisiones potenciales fueron menores cuando el ciclista circulaba cercano al centro del carril y cuando el hueco con el vehículo opuesto fue menor.

2.3.2 Variables analizadas

La gran mayoría de investigaciones previas centradas en el estudio de la maniobra de adelantamiento entre vehículos motorizados y ciclistas en carreteras convencionales se centraron en el análisis de la separación lateral entre estos usuarios durante el adelantamiento, estudiando la afección sobre la separación lateral de factores relativos a la vía, a los vehículos adelantantes y a los ciclistas. Rubie et al. (2020) realizaron una revisión de 42 investigaciones publicadas centradas en la separación lateral durante el adelantamiento a ciclistas. Se obtuvieron relaciones positivas significativas entre la separación lateral y el ancho de la carretera, y entre la separación lateral y el límite de velocidad; y separaciones laterales menores cuando los ciclistas fueron adelantados por vehículos de mayor tamaño. El efecto de la infraestructura para bicicletas en carretera fue inconsistente. Los estudios que consideraron factores ciclistas como el género o el tipo de ciclista mostraron resultados mixtos. Siete de ocho estudios concluyeron que cuanto más se acercaba el ciclista al borde, mayor era la separación lateral. Por último, la estrategia de adelantamiento elegida por los conductores (lanzada o en seguimiento) también arrojó resultados mixtos. Los resultados de la revisión indican que la distancia que deja un conductor entre su vehículo y otros usuarios de la carretera se basa en el intento de mantener su propia zona de confort. Otros vehículos motorizados presentan un riesgo mayor para los conductores que las bicicletas, por lo que la distancia que un conductor elige entre su vehículo y una bicicleta puede verse comprometida si hay otros vehículos presentes o si el espacio disponible es restringido.

Algunos estudios más recientes ampliaron las variables analizadas a la fuerza aerodinámica durante el adelantamiento, a la velocidad del vehículo adelantante o a márgenes de distancias de seguridad con el ciclista durante toda la maniobra. No obstante, todas las investigaciones revisadas enfocaron las interacciones entre ciclistas y conductores en carreteras convencionales desde el punto de vista de la seguridad, y ninguna de ellas analizó la afección sobre la funcionalidad del tráfico en estas condiciones.

2.4 Microsimulación del tráfico

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 de 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.

En este apartado se revisan algunos de los principales modelos de microsimulación de tráfico existentes, y en cómo han abordado la simulación de ciclistas, centrando la revisión de la literatura particularmente en la descripción del microsimulador de tráfico Aimsun Next, utilizado en la presente investigación.

2.4.1 Modelos de microsimulación del tráfico existentes

Los modelos de microsimulación del tráfico requieren desarrollar teorías que describan el movimiento de los usuarios en la vía y sus interacciones. El modelado preciso de bicicletas en herramientas de microsimulación es un desafío debido a la disponibilidad limitada de datos detallados, la complejidad de la toma de decisiones de los ciclistas y la heterogeneidad en el comportamiento de los ciclistas (Mohammed et al., 2021).

Esta complejidad observada en el movimiento de los ciclistas es más elevada en zonas urbanas, mientras que, en carreteras convencionales en las que la pendiente es reducida o nula generalmente los ciclistas siguen una trayectoria sin excesivas variaciones en cuanto a su ruta y velocidad.

La mayoría de microsimuladores de tráfico han sido diseñados y desarrollados teniendo en cuenta el movimiento y las interacciones del tráfico motorizado, y más aún en carreteras bidireccionales, en las que los dos sentidos de circulación interactúan en maniobras de adelantamiento. En la mayoría de los microsimuladores de tráfico que permiten simular carreteras convencionales es posible incluir bicicletas en las simulaciones, pero utilizando los mismos modelos de comportamiento utilizados para describir los vehículos motorizados. Los parámetros son adaptados para reflejar las velocidades más reducidas de circulación de los ciclistas (Twaddle et al., 2014).

En zona urbana si se han desarrollado modelos que permite simular el comportamiento particular de los ciclistas a nivel microscópico. Algunos de los estudios más recientes que han incorporado a ciclistas en modelos de microsimulación se han descrito en el apartado 2.3.1.

Gran parte de los microsimuladores de tráfico utilizan dos modelos independientes para modelar el desplazamiento longitudinal y lateral de los usuarios. Los modelos longitudinales representan el espacio continuo y el tiempo discreto, y se basan en modelos de seguimiento entre usuarios. Los modelos de seguimiento de usuarios utilizan datos de la velocidad y posición del vehículo precedente para determinar el comportamiento del vehículo que circula en seguimiento, y si el vehículo precedente está lo suficientemente alejado para no influir en el comportamiento del seguidor, este circula a su velocidad deseada.

En estos modelos el movimiento lateral de los vehículos viene determinado por modelos discretos de cambio de carril, influyendo en el cambio de carril las velocidades y posiciones de los otros usuarios y las propias del usuario interesado en el cambio de carril. En la mayoría de estos modelos no es posible el movimiento lateral dentro del mismo carril.

Estos modelos pueden presentar problemas en tramos urbanos, donde los vehículos motorizados adelantan a los ciclistas sin cambiar de carril, sin embargo, en carreteras convencionales, para adelantar a un ciclista en la gran mayoría de los casos es necesario invadir el carril contrario. Algunas soluciones para adaptar los modelos longitudinales continuos a la circulación de ciclistas ha sido subdividir los carriles en zonas donde cada usuario puede circular independientemente, usando un modelo discreto en cada una de ellas.

Aldred et al. (2019) pusieron de manifiesto la dificultad de introducir a los ciclistas en microsimuladores de tráfico debido a que la gran mayoría de microsimuladores (VISSIM, Aimsun Next, Sumo) utilizan intervalos de tiempo discretos y modelos de movimiento longitudinales y laterales independientes. Para los ciclistas estos modelos no se adaptan fielmente a la realidad observada, sobre todo en zonas urbanas, donde la capacidad de maniobrar de los ciclistas es superior que en las zonas interurbanas.

Aimsun Next desarrolló un modelo en su nueva versión Amsun Next 20 en el que se pueden introducir vehículos con un comportamiento no basado en carriles, permitiendo incorporar a bicicletas en este modelo bidimensional. Es importante señalar que el modelo de comportamiento para ciclistas no basado en carriles está destinado a la simulación microscópica de toda la ciudad, centrándose en el impacto de los ciclistas sobre un área, más que en la representación de trayectorias realistas para vehículos individuales (Aimsun, 2021).

Para permitir el comportamiento no basado en carriles en Aimsun Next 20 se deben de habilitar varias opciones en el microsimulador respecto al experimento, la sección y el tipo de vehículo. Esto permite limitar el comportamiento no basado en carriles a solamente las bicicletas y en las secciones que se requiera, permitiendo que los vehículos motorizados sigan con el comportamiento de cambio de carril discreto (ver Figura 14).

Para controlar el movimiento lateral de los ciclistas se incorporaron dos parámetros incluidos en el tipo de vehículo: la velocidad máxima lateral y la distancia lateral. Estos parámetros definen la distancia que un usuario puede recorrer lateralmente en cada paso de tiempo de la simulación y la distancia que debe existir entre él y otro vehículo para permitir el modelo no basado en carriles. La distancia lateral mínima entre dos vehículos no basados en carriles es la suma de las distancias laterales de ambos vehículos, siendo la separación lateral mínima entre un vehículo

no basado en carriles y un vehículo normal la separación lateral del vehículo no basado en carriles únicamente.

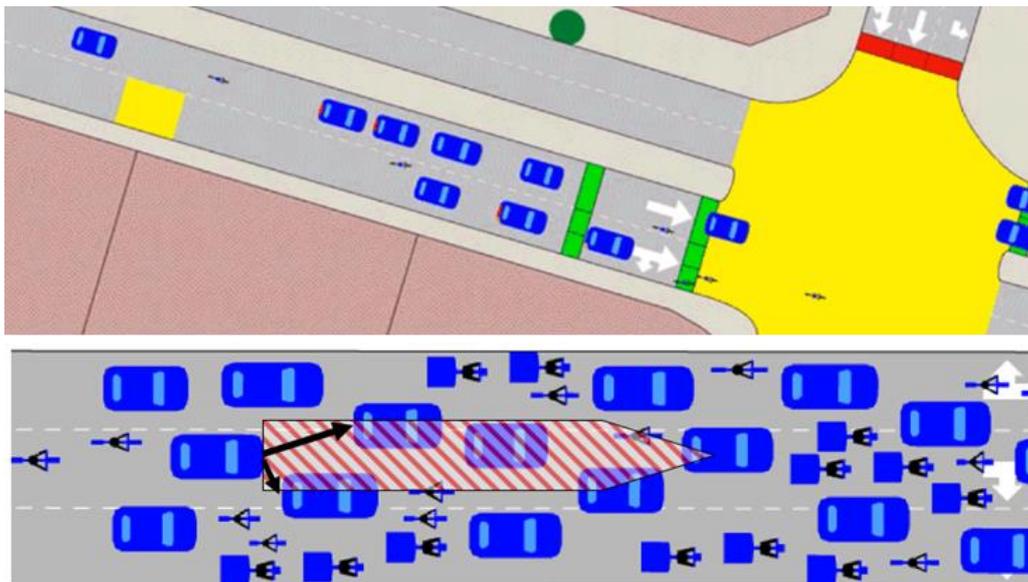


Figura 14. Simulación de bicicletas considerando el modelo no basado en carriles en Aimsun Next 20 (Aimsun, 2021).

No obstante, este modelo bidireccional desarrollado en Aimsun Next 20 no es compatible con el modelo bidireccional utilizado para simular carreteras convencionales.

Existen varios estudios relacionados con la microsimulación del tráfico ciclista (Aldred et al., 2019; Mohammed et al., 2021, 2019), sin embargo, estos estudios están enfocados en un entorno urbano, y en ellos no se ha modelizado la interacción de ciclistas y vehículos a motor, ni las interacciones con el tráfico que circula en el sentido opuesto. Se desconoce la existencia de investigaciones anteriores enfocadas a la microsimulación de tráfico mixto considerando vehículos motorizados y bicicletas en carreteras convencionales, por tanto, los modelos de microsimulación de tráfico existentes en la actualidad no han sido adaptados a estas circunstancias.

2.4.2 Microsimulador de tráfico Aimsun Next

Aimsun Next permite modelizar redes de transporte para construir un gemelo digital de una ciudad o carretera, simular los viajes que la gente quiere hacer, y combinarlos con las opciones de transporte disponibles, como taxis, autobuses, coches compartidos, bicicletas o incluso caminar (Aimsun, 2021). Aimsun Next permite realizar evaluaciones de operaciones de tráfico de cualquier escala y complejidad. En la Figura 15 se representa la evolución de Aimsun Next, con las versiones que se han ido creando y las principales mejoras incorporadas en cada una de ellas.



Figura 15. Evolución de Aimsun Next (Aimsun, 2021).

En junio de 2020 se lanzó la última versión disponible Aimsun Next 20, que se centra en la modelización de los peatones, las bicicletas y la interacción entre los pasajeros y los vehículos de transporte público, lo que supone un gran paso hacia el objetivo final de modelizar los individuos y la movilidad multimodal (Aimsun, 2021).

En el desarrollo de la presente tesis se ha contado con la colaboración del equipo de Aimsun Next, por una parte, para la disposición de las licencias de uso del programa, y por otra parte en cuanto al desarrollo de la investigación. En esta segunda parte se han realizado varias reuniones con el equipo de Aimsun Next en las que se han comentado las limitaciones encontradas específicamente en el módulo de adelantamientos en carreteras convencionales a la hora de incorporar a los ciclistas y de simular correctamente la maniobra de adelantamiento.

Fruto de estas interacciones entre el equipo de Aimsun Next y la doctoranda que ha llevado a cabo la presente tesis se incorporaron una serie de mejoras que han permitido realizar con éxito esta investigación.

A continuación, se describe resumidamente el funcionamiento del microsimulador de tráfico Aimsun Next, en su versión Aimsun Next 20, el cual ha sido utilizado para el desarrollo de la presente investigación. Concretamente se describe el módulo de adelantamientos en carreteras convencionales, explicando los modelos en los que se basa este módulo, así como los parámetros, los datos de entrada necesarios y los resultados obtenidos mediante el microsimulador.

2.4.2.1 Módulo de adelantamiento en carreteras convencionales

El modelo de microsimulación de tráfico para carreteras convencionales que permite el adelantamiento fue desarrollado por Llorca et al. (2015). Su desarrollo, calibración y validación se realizó en base a datos observados en carreteras convencionales de la Comunitat Valenciana.

Este modelo parte de un desarrollo físico en el que se modelizó una carretera convencional mediante la creación de dos secciones que representan cada uno de los sentidos de circulación en las que se introducen las características físicas (visibilidad, líneas continuas, velocidad límite) relativas a cada uno de ellos. Estas dos secciones se unen creando una vía de dos sentidos, uno para cada sentido de circulación, en el microsimulador se denominan secciones espejo.

La maniobra de adelantamiento está basada en las etapas de deseo, decisión y ejecución. En una carretera convencional se considera que un vehículo circula en seguimiento o cola cuando lo hace a una velocidad menor a la deseada por causas debidas al tráfico que le precede. Cuando

un vehículo circula en cola se considera la posibilidad de adelantar. Para cada vehículo que circula en cola se evalúa el deseo de adelantar en base a cinco características: su rango en la cola (Rank), la demora acumulada (*delay*), la diferencia entre su velocidad deseada y la velocidad del vehículo líder (*dV*) y el tiempo restante hasta el fin del tramo (*remainingtime*). El deseo, la decisión y la ejecución de adelantar se rige en función de parámetros particulares de Aimsun Next relativos al experimento, a la sección y al tipo de vehículo mostrados en la Tabla 1.

Parámetros del experimento	
Umbral del tiempo de demora (<i>delayTh</i>)	
Umbral mínimo de diferencia de velocidades (<i>mindV</i>)	
Umbral máximo de diferencia de velocidades (<i>maxdV</i>)	
Máximo rango en la cola (<i>maxRank</i>)	
Umbral de tiempo restante hasta el fin del tramo (<i>remainingtimeTh</i>)	
Número de adelantamientos simultáneos permitidos (<i>maxSimul</i>)	
Demora entre adelantamientos simultáneos (<i>delaySimul</i>)	
Factor de reducción de seguimiento (<i>RFC</i>)	
Factor de mejora de la velocidad durante el adelantamiento (<i>PVSE</i>)	
Umbral de diferencia de velocidad para la mejora de la velocidad durante el adelantamiento (<i>PVSETh</i>)	
Umbral de diferencia de velocidad para adelantar con línea continua	
Tiempo de reacción (<i>reactiontime</i>)	
Parámetros de la sección	
Sección espejo (<i>MirrorsectionID</i>)	
Distancia de visibilidad (<i>ASD</i>)	
Factor de visibilidad (<i>SDfactor</i>)	
Longitud	
Velocidad límite (<i>Slimit</i>)	
Parámetros del vehículo	
Margen de seguridad para el adelantamiento (<i>Safetymargin</i>)	
Velocidad máxima deseada (<i>Vmax</i>)	
Factor de aceptación de la velocidad límite (θ)	
Aceleración máxima (<i>Amax</i>)	
Deceleración normal	

Tabla 1. Parámetros del modelo de adelantamiento en carretera convencional de Aimsun Next (Aimsun, 2021).

El deseo de adelantar se rige según los gráficos mostrados en la Figura 16, considerando los parámetros mostrados. El deseo de adelantar se basa en la diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad del vehículo líder, cuando esta diferencia es mayor que *maxdV* el deseo siempre es positivo, cuando es menor que *mindV* el deseo es negativo, y cuando se encuentra entre estos dos valores varía linealmente como se observa en el gráfico izquierdo de la Figura 16.

En cuanto al tiempo de demora acumulada debida al seguimiento, el deseo de adelantar es mayor a medida que la demora también lo es. El deseo de adelantar depende también del rango en la cola que ocupe el vehículo, siendo nulo cuando se encuentre en la posición denominada *maxrank*. El tiempo restante hasta el final del tramo también influye en el deseo de adelantar según el gráfico derecho de la Figura 16, de manera que va decreciendo linealmente cuando el tiempo hasta el final del tramo alcanza el valor *remainingtimeTh*.

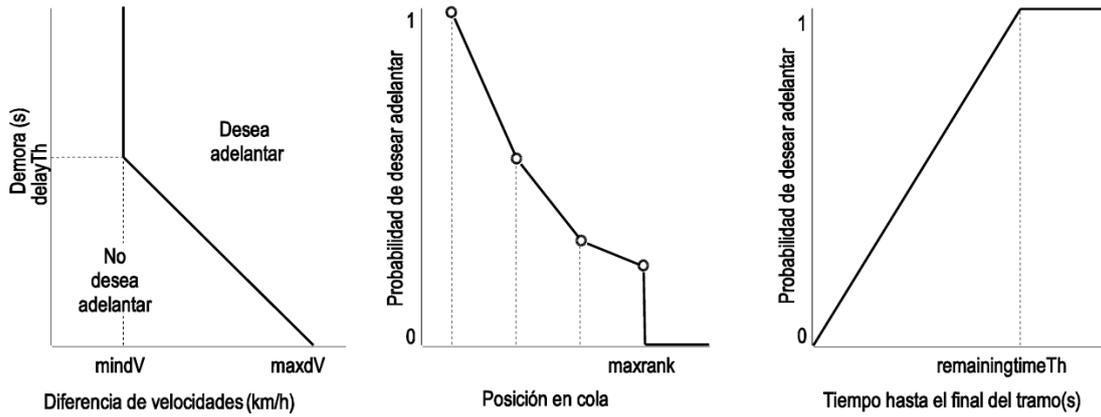


Figura 16. Deseo de adelantar y principales parámetros de los que depende (Llorca et al., 2015).

Cuando el deseo de adelantar es positivo se inicia la etapa de decisión, y el vehículo empieza el seguimiento aplicando la reducción de distancia de seguimiento según el parámetro *RCF*. Esta reducción de la distancia de seguimiento se incorpora en el modelo de seguimiento de Gipps considerado en Aimsun Next mostrado en la ecuación (2).

$$V_f(t + dt) = b_f dt + \sqrt{(b_f dt)^2 - b_f [2(x_l(t) - x_f(t) - l_l - s_f) - V_f(t) - \frac{V_l^2(t)}{RCF * b_l}]} \quad (2)$$

Donde:

- x_f, V_f y b_f son la posición, la velocidad y la deceleración normal del vehículo en seguimiento
- x_l, V_l y b_l son la posición, la velocidad y la deceleración normal del vehículo líder
- s_f es el hueco (m)
- l_l es la longitud del líder (m)
- RCF* es el factor de corrección. En condiciones normales *RFC*=1, para este caso *RFC*<1
- dt* es el paso de simulación

La decisión de adelantar depende de una serie de verificaciones. La primera es comprobar si existe línea continua que prohíba cambiar hacia el carril de adelantamiento, en caso afirmativo se comprueba el nuevo parámetro incorporado a la versión Aimsun Next 20 que permite adelantar a vehículos lentos incluso en línea continua si la diferencia de velocidades deseadas entre ellos es mayor que el parámetro incorporado para cada sección. A continuación, se comprueba si el vehículo líder está siendo adelantado por otro usuario, y si es el caso se comprueba el parámetro *maxSim* que tiene en cuenta si se permiten adelantamientos múltiples, también se comprueba si se respeta la demora entre adelantamientos simultáneos *delaySimul*.

Si se permite el adelantamiento, se evalúa la viabilidad de adelantar. Si la diferencia de velocidad entre la velocidad deseada (*Vmax*) y la velocidad real del líder inmediato es menor que el umbral de diferencia de velocidad para la aceptación de velocidad de adelantamiento (*PVSETh*), el vehículo utilizará una velocidad deseada mejorada para adelantar especificada por el factor de mejora de velocidad de adelantamiento (*PVSE*).

La duración de la maniobra de adelantamiento se calcula asumiendo que el vehículo mantiene una aceleración constante hasta que alcanza la velocidad deseada (*Vmax*), después de lo cual mantiene una velocidad constante. El tiempo hasta la colisión con el vehículo opuesto más cercano también se calcula asumiendo que este también mantiene una velocidad constante. Si no hay ningún vehículo opuesto, o si está ubicado más lejos que la distancia de visibilidad dada por el parámetro de distancia de visibilidad de la sección desde el final de la zona de

adelantamiento (*ASD*), el modelo genera un vehículo ficticio ubicado en el borde de visibilidad según el factor (*SDfactor*), que controla la percepción de la distancia de visibilidad. Finalmente, también se calcula el tiempo restante antes del final de la zona de adelantamiento y se compara con el umbral prefijado (*remainingtimeTh*).

El vehículo iniciará la maniobra de adelantamiento si la maniobra se puede completar antes del final de la zona de adelantamiento y si la duración de la maniobra es menor que el tiempo de colisión teniendo en cuenta un margen de seguridad definido por el parámetro *Safetymargin*. Una vez tomada la decisión de adelantar, el vehículo acelera a su máxima aceleración (*Amax*) hasta alcanzar la velocidad deseada (*Vmax*). La viabilidad de la maniobra se reevalúa en cada paso de la simulación durante todo el adelantamiento. Dependiendo de la duración restante del adelantamiento, el tiempo hasta la colisión y si el vehículo ha pasado el punto crítico en el que abortar la maniobra es más lento que completarla, el vehículo seguirá una de las cinco opciones posibles:

1. La maniobra aún no ha finalizado y no hay riesgo de colisión con los opuestos: el vehículo sigue adelantando con una aceleración constante correspondiente a su aceleración máxima hasta alcanzar su velocidad máxima. Luego sigue adelantando a velocidad constante.
2. La maniobra se ha completado: el vehículo vuelve a su carril original delante del vehículo que estaba adelantando.
3. La maniobra aún no ha finalizado y existe riesgo de colisión, pero no inminente: el vehículo acelera para completar la maniobra antes de la colisión.
4. La maniobra aún no ha finalizado, existe riesgo inmediato de colisión y el vehículo ya ha pasado el punto crítico: el vehículo acelera para volver a su carril de origen por delante del vehículo adelantado, obligándolo a desacelerar.
5. La maniobra aún no ha finalizado, existe un riesgo inmediato de colisión y el vehículo aún no ha pasado el punto crítico: el vehículo aborta la maniobra de adelantamiento y vuelve a su carril original desacelerando detrás del vehículo que estaba tratando de adelantar.

En la Figura 17 se muestra el diagrama de flujo del modelo de adelantamientos en carreteras convencionales implementado en Aimsun Next con las distintas fases consideradas.

En el desarrollo del modelo se han definido algunos tiempos necesarios para realizar las comprobaciones en cada paso de simulación:

- PT: duración del adelantamiento.
- TC: tiempo hasta la colisión con el vehículo opuesto real o ficticio.
- TS: tiempo hasta el final de la zona.
- AT: tiempo de aborto de la maniobra, es el tiempo necesario para que un vehículo decelere i regrese a su posición en el carril propio sin adelantar.

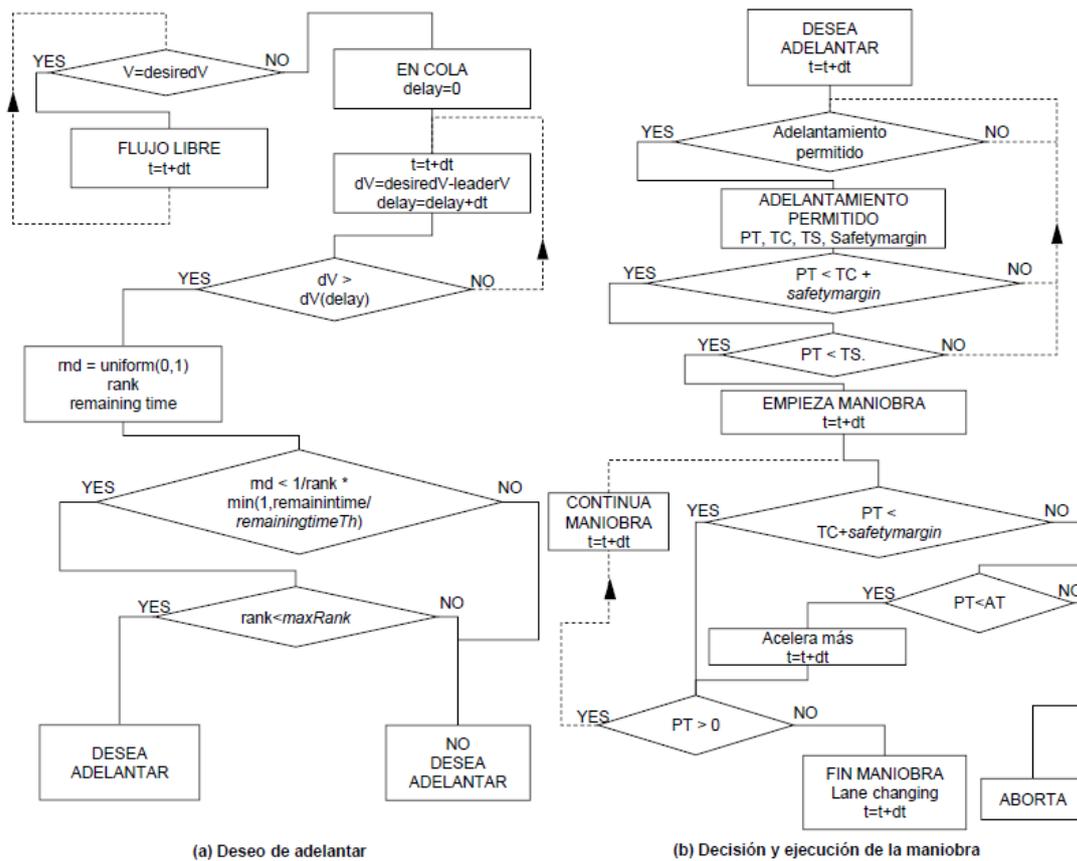


Figura 17. Diagrama de flujo del modelo de adelantamiento en carreteras convencionales (Llorca et al., 2015).

2.5 Análisis de la funcionalidad del tráfico

En España la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales, a falta de normativa propia, se evalúa mediante la metodología descrita en el Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016). En este manual se describe la metodología para calcular el nivel de servicio de una carretera convencional en su Capítulo 15. En este capítulo se describen las medidas de desempeño utilizadas para determinar el nivel de servicio de una carretera convencional, así como las metodologías para su cálculo, tanto para el tráfico motorizado como para el de bicicletas. Sin embargo, estos niveles de servicio se consideran independientemente, y en este manual no se considera la afección de un tráfico mixto sobre el tráfico motorizado.

En el año 2018 el Transportation Research Board realizó un estudio a raíz de las deficiencias y limitaciones observadas en diferentes investigaciones sobre el procedimiento actual de análisis del Highway Capacity Manual titulado "Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance". Este estudio surgió con la finalidad de abordar estas limitaciones y proponer mejoras en cuanto a conseguir una metodología que permita ajustarse más a la realidad observada y facilitar y simplificar en la medida de lo posible el cálculo del nivel de servicio en carreteras convencionales.

En este apartado se describen las metodologías desarrolladas en el Highway Capacity Manual, en su versión oficial actualmente (6th edition), y en el estudio realizado por el Transportation Research Board (2018) en el que se ha basado la versión 6.1 del Highway Capacity Manual aún no publicada oficialmente.

2.5.1 Nivel de servicio para el tráfico ciclista

En el apartado cinco del Capítulo 15 del Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016) se describe la metodología de cálculo del nivel de servicio para bicicletas en carreteras convencionales. El modelo de nivel de servicio para bicicletas se basa en un modelo de percepción del usuario. Este modelo considera variables independientes asociadas con las características de la carretera, basadas en los resultados de una encuesta realizada a usuarios que calificó la comodidad de varias instalaciones para bicicletas. Esta metodología fue diseñada en zonas urbanas y suburbanas, y aunque se ha aplicado en carreteras convencionales, los autores recomiendan tener cuidado al interpretar los resultados en carreteras con condiciones diferentes a las observadas en los tramos donde se basó el estudio.

El resultado final del nivel de servicio de bicicletas generalmente varía entre 0.5 y 6.5, y se estratifica para conseguir un resultado de nivel de servicio en la escala A-F, al igual que para los vehículos motorizados. Este método se puede aplicar en arcenes pavimentados, carriles bici y carriles compartidos en carreteras convencionales. El nivel de servicio de bicicletas en estas condiciones presenta una sensibilidad a la separación entre bicicletas y vehículos motorizados, el volumen y velocidad de los vehículos motorizados, la presencia de vehículos motorizados pesados y las condiciones del pavimento. Las condiciones del pavimento se determinan en una escala con cinco niveles.

El cálculo del nivel de servicio de bicicletas se compone de cinco pasos:

1. Recolección de datos de entrada. Los datos de entrada necesarios son: ancho de carril y arcén, número de carriles direccionales, límite de velocidad, condiciones del pavimento, datos de demanda de motorizados y ocupación de aparcamiento sobre la vía.
2. Cálculo del flujo direccional en el carril externo. Este volumen se calcula como el volumen horario entre el factor de hora pico y entre el número de carriles direccionales.
3. Cálculo del ancho efectivo del carril externo. Se calcula en función del ancho real del carril y del arcén, del volumen de motorizados y de la ocupación por zonas de aparcamiento en la vía.
4. Cálculo del factor de velocidad efectiva. Se calcula en base al límite de velocidad especificado en el tramo de carretera.
5. Determinación del nivel de servicio de bicicletas. se calcula en función de todas las variables obtenidas en los pasos anteriores según la ecuación 3:

$$BLOS = 0.507 \ln(v_{OL}) + 0.1999S_t(1 + 10.38HV)^2 + 7.066\left(\frac{1}{P}\right)^2 - 0.005(W_e)^2 + 0.760 \quad (3)$$

Donde:

$BLOS$ es el nivel de servicio de bicicletas

v_{OL} es el flujo direccional en el carril externo (veh/h)

S_t es el factor de velocidad efectiva

HV es el porcentaje de vehículos motorizados pesados

P es el nivel de estado del pavimento según la metodología explicada en el manual

W_e es el ancho efectivo del carril externo (ft)

Finalmente, el nivel de servicio de bicicletas en carreteras convencionales se determina según el valor obtenido de BLOS y los umbrales especificados en la Tabla 2. Como ya se ha comentado estos valores del nivel de servicio corresponden a percepciones de los usuarios ciclistas en su recorrido del tramo.

LOS	BLOS Score
A	≤1.5
B	>1.5-2.5
C	>2.5-3.5
D	>3.5-4.5
E	>4.5-5.5
F	>5.5

Tabla 2. Nivel de servicio de bicicletas en carreteras convencionales (Transportation Research Board, 2016).

Existen varios estudios enfocados al nivel de servicio de bicicletas, pero la gran mayoría de ellos se desarrollan en entorno urbano, y en carriles específicos para la circulación de bicicletas, o compartidos con otros vehículos de movilidad personal.

Un estudio reciente realizado por Kazemzadeh et al. (2020) ha revisado las investigaciones realizadas en los últimos años en el campo del nivel de servicio de las bicicletas, incorporando al estudio 190 artículos científicos desarrollados en este ámbito. Aunque la mayor parte de estas investigaciones se han realizado en el marco de las vías urbanas, y de uso exclusivo para bicicletas, algunas de sus conclusiones se pueden extrapolar a las carreteras interurbanas. Este estudio da un paso hacia la integración de variables de investigación similares en estudios del nivel de servicio de bicicletas, definiendo de una manera más clara conceptos y terminologías utilizadas en este campo como el nivel de servicio, el nivel de comodidad, la ciclabilidad o la amabilidad. El nivel de servicio de bicicletas se corresponde con un nivel de confort percibido por los ciclistas, y basado en diversas variables. En la Figura 18 se muestran las principales variables incluidas en la definición del concepto de nivel de servicio de bicicletas.

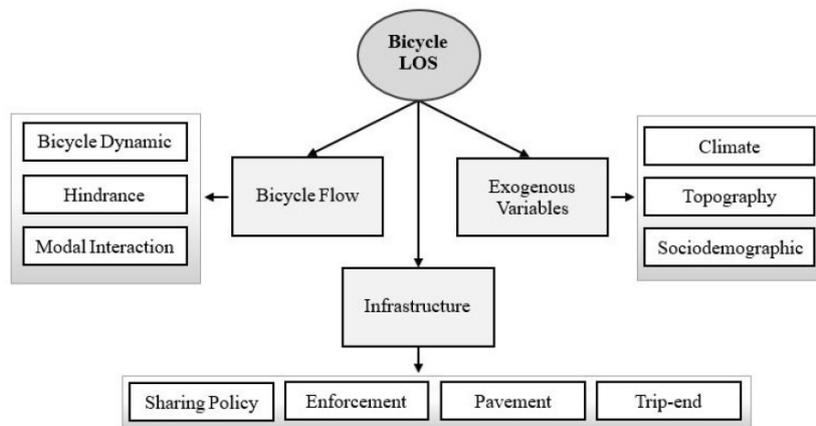


Figura 18. Variables incluidas en la definición del nivel de servicio de bicicletas adoptado por Kazemzadeh et al. (2020).

Estas variables se han clasificado en tres grupos: las relativas al flujo de ciclistas, a la infraestructura y las correspondientes a variables exógenas. Los dos primeros tipos de variables pueden ser controladas y modificadas por los agentes gestores de las vías. El flujo de ciclistas es una variable especialmente importante en el nivel de servicio de bicicletas, ya que influye en el entendimiento del movimiento de las bicicletas y de cómo este afecta a la percepción de los usuarios.

Dentro del flujo de los ciclistas se consideran tres tipologías de variables. La primera corresponde con las dinámicas de la bicicleta, centrada en el movimiento, considerando variables como la comodidad y la libertad de movimiento lateral del ciclista, determinando el espacio alrededor de la bicicleta. La segunda se refiere al impedimento, que se define como el grado en que se

niega a un usuario la libertad de maniobra y ocurre mientras un ciclista pasa o se encuentra con otro ciclista o peatón más lento. Se analizan maniobras de adelantamiento y de cruce con diferentes usuarios de la vía, pero en ninguno de estos estudios se consideran las interacciones entre bicicletas y vehículos motorizados, y mucho menos en carreteras convencionales. La tercera tipología de variables corresponde con interacciones entre diferentes modos de transporte, basadas en características de bicicletas eléctricas, de peatones y de vehículos motorizados.

Las características de los vehículos a motor se han utilizado para estimar la comodidad de los ciclistas en este campo, específicamente los volúmenes y velocidades de los vehículos motorizados, los vehículos pesados y el nivel de servicio de los vehículos a motor se han utilizado en la mayoría de los estudios de nivel de servicio de bicicletas. Sin embargo, en muy pocos estudios se ha considerado el tráfico mixto en carreteras convencionales.

Las variables relacionadas con la infraestructura engloban la política de uso compartido, considerando la circulación en vías denominadas “on-street” y “off-street” según compartan la vía con motorizados. Varios estudios dentro de la literatura han confirmado que los ciclistas prefieren utilizar instalaciones fuera de la carretera y que los ciclistas en general consideran que las instalaciones fuera de la carretera son más seguras que las que se encuentran en la carretera. Dentro de las variables relacionadas con la infraestructura también se encuentra el control del tráfico, el cual puede ayudar a guiar, regular y advertir a los ciclistas. Las condiciones del pavimento, evaluando su estado, han sido utilizadas como uno de los principales indicadores de confort percibido por los ciclistas.

Finalmente, las instalaciones de final de viaje pueden animar a los ciclistas y mejorar sus niveles de comodidad, estas condiciones se refieren por ejemplo a la disposición de zonas para aparcar las bicicletas.

2.5.2 Nivel de servicio para el tráfico motorizado

En este apartado se describen las metodologías utilizadas para el cálculo y el análisis del nivel de servicio del tráfico motorizado en carreteras convencionales utilizadas en el Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016) y en el estudio posterior realizado por el Transportation Research Board (2018) en el que se pretende superar las limitaciones y deficiencias observadas en el Highway Capacity Manual.

2.5.2.1 Highway Capacity Manual versión 6.0

El Capítulo 15 del Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016) en su apartado 3, describe la metodología utilizada para calcular el nivel de servicio para vehículos motorizados en carreteras convencionales. Debido al amplio rango de funciones que cubren las carreteras convencionales, en este manual se definen tres tipos de carreteras convencionales según su función:

- Clase I: donde los conductores esperan viajar a velocidades relativamente elevadas. corresponden con carreteras convencionales utilizadas para viajes de largo recorrido.
- Clase II: donde los conductores no necesariamente esperan viajar a velocidades elevadas. Corresponden con carreteras de acceso a las de clase I, o situadas en zonas con una distancia de visibilidad reducida.
- Clase III: se sitúan en zonas con un desarrollo moderado, presentando velocidades límite reducidas, y generalmente presentan cruces con otras vías.

En el Highway Capacity Manual se definen tres medidas de desempeño que sirven para caracterizar la funcionalidad el tráfico y el nivel de servicio de estas vías:

- **Velocidad media de recorrido (ATS):** esta medida de desempeño refleja la movilidad en una carretera convencional. Se define como la longitud del segmento de carretera dividida entre el tiempo de recorrido del tramo para los vehículos que han recorrido el tramo durante el periodo de análisis.
- **Porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF):** esta medida de desempeño representa la libertad de maniobra y el confort y la conveniencia del viaje. Es el porcentaje medio de tiempo en el que los vehículos deben de circular en seguimiento detrás de vehículos más lentos debido a la imposibilidad de adelantarles. Se trata de una medida de desempeño difícilmente medible en campo, por ello se utiliza una medida subrogada definida como el porcentaje de vehículos que circulan en cola de otros, considerando un intervalo de tiempo menor de 3 s, en localizaciones representativas situadas en el segmento de estudio. PTSF también representa el porcentaje de vehículos que circulan en seguimiento.
- **Porcentaje de velocidad de flujo libre (PFFS):** representa la habilidad de los vehículos para circular a una velocidad cercana al límite de velocidad de la carretera. Es el ratio entre ATS y la velocidad de flujo libre.

Debido a las expectativas de los conductores durante su recorrido por las diferentes tipologías de carretera convencional descritas y el nivel de operación de estas carreteras el nivel de servicio en cada una de ellas bien determinado por algunas de estas medidas de desempeño. Para las carreteras clasificadas como clase I, el nivel de servicio se determina con ATS y PFFS, mientras que en las carreteras de clase II el nivel de servicio se determina mediante los valores obtenidos en el PTSF, y en las de clase III solamente se utiliza el PFFS. En la Tabla 3 se muestran los diferentes niveles de servicio de la carretera según los umbrales de las medidas de desempeño para los tres tipos de carreteras descritos. Los niveles de servicio alcanzados varían entre A y F, representando el nivel A el mejor nivel mientras que el F representa que la vía se encuentra en congestión.

Nivel de servicio (LOS)	Clase I		Clase II	Clase III
	ATS (km/h)	PTSF (%)	PTSF (%)	PFFS (%)
A	>88.51	≤35	≤40	>91.7
B	>80.47-88.51	>40-55	>40-55	>83.3-91.7
C	>72.42-80.47	>55-70	>55-70	>75.0-83.3
D	>64.37-72.42	>70-85	>70-85	>66.7-75.0
E	≤64.37	>85	>85	≤66.7
F	La demanda excede la capacidad			

Tabla 3. Nivel de servicio para vehículos motorizados en carreteras convencionales (Transportation Research Board, 2016).

El Highway Capacity Manual también define dos características con un elevado impacto sobre la funcionalidad de estas vías y el nivel de percepción del servicio de los conductores:

- **Capacidad de adelantamiento:** las maniobras de adelantamiento en carreteras convencionales deben de realizarse en el carril destinado al tráfico opuesto, por tanto, la capacidad de adelantamiento está limitada por el nivel de tráfico y por la distribución de huecos en el sentido opuesto.
- **Demanda de adelantamiento:** a medida que el seguimiento y el PTSF aumentan en un sentido de circulación también lo hace la demanda de adelantamiento.

La capacidad y la demanda de adelantamiento están relacionadas con el nivel de tráfico en la carretera, a medida que aumenta el nivel de tráfico en un sentido aumenta también la demanda de adelantamiento; mientras que a medida que aumenta el nivel de tráfico en sentido opuesto decrece la capacidad de adelantamiento.

2.5.2.2 Highway Capacity Manual versión 6.1 (pre-publication)

El Highway Capacity Manual (HCM) (Transportation Research Board, 2016) describe la metodología actual en cuanto al análisis del nivel de servicio de una carretera convencional, sin embargo, varias investigaciones han criticado el procedimiento utilizado por el HCM identificando algunas limitaciones y deficiencias, como la relación entre velocidad y flujo, el uso de medidas de desempeño adecuadas, el tratamiento de vehículos pesados, la estimación de la velocidad de flujo libre, la precisión de los carriles de adelantamiento y limitaciones en el alcance del análisis. Fruto de estas limitaciones observadas se desarrolló un estudio con el fin de abordarlas y definir soluciones y mejoras. Este estudio se publicó en 2018 con el título “Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance” por Transportation Research Board (2018), e incluye los siguientes logros:

- Desarrollo de un modelo más realista de la relación velocidad-flujo.
- Introducción de una nueva y única medida de desempeño: la densidad de seguidores.
- Nuevo umbral para identificar mejor el estado de seguimiento: 2.5 s.
- Desarrollo de la relación del porcentaje de seguidores-flujo.
- Eliminación de los vehículos ligeros equivalentes (PCE) y uso directo del porcentaje de vehículos pesados en los modelos de estimación de las medidas de desempeño.
- Mejora de la estimación de la velocidad de flujo libre base basada en la velocidad límite
- Desarrollo de nuevas funciones para carriles de adelantamiento (carreteras 2+1).
- Desarrollo de un método para combinar el análisis de múltiples segmentos contiguos en un análisis a nivel de sección.
- Facilidad de uso de la metodología del HCM: eliminación de tablas que requerían interpolación, eliminación de PCE, uso de una sola medida de desempeño y eliminación del PTSF.

Al-Kaisy et al. (2018) realizaron una revisión de medidas de desempeño e indicadores para caracterizar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales dentro del marco del análisis realizado por el Transportation Research Board (2018), concluyendo que ninguna medida de desempeño satisface todos los criterios de evaluación, presentando algunas de ellas un grado de cumplimiento elevado para unos criterios y a la vez incumpliendo otros, por tanto, recomiendan utilizar más de una medida de desempeño para caracterizar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales.

A partir de todos estos estudios y análisis realizados con el fin de superar las limitaciones observadas en la metodología del HCM para el análisis del nivel de servicio en carreteras convencionales se desarrolló una nueva versión del Capítulo 15 del HCM. En esta nueva versión, que aún no está publicada oficialmente, se desarrolla una metodología para el cálculo del nivel de servicio de carreteras convencionales basada en una única medida de desempeño: la densidad de seguidores.

En esta nueva versión del Capítulo 15 del HCM las carreteras convencionales no se clasifican en clases, sino que se segmentan en subtramos con características homogéneas de capacidad de adelantamiento, geometría del carril, pendiente, ancho de carril y arcén, velocidad límite, demanda de tráfico, uso del terreno adyacente y demás características de la vía que permitan

obtener segmentos homogéneos de cara a realizar el análisis. La metodología descrita en este documento se aplica a tres tipologías de segmentos según se permita el adelantamiento en ellos o no: segmentos sin adelantamiento permitido, con adelantamiento permitido y carriles de adelantamiento. El análisis realizado es direccional, ya que las zonas de adelantamiento permitido varían en los dos sentidos de circulación. Para cada uno de estos tipos de segmento se realiza un análisis dependiendo del flujo de tráfico en cada sentido, del porcentaje de vehículos pesados, de la alineación vertical y horizontal y de la longitud del segmento.

Las medidas de desempeño en las que se basa este análisis son:

- **Velocidad media (S).** Es una medida de desempeño clave en carreteras convencionales. En el HCM versión 6.1 se definen las ecuaciones y modelos para su cálculo a partir de la velocidad de flujo libre de cada segmento, del volumen de tráfico direccional, de la pendiente, de la alineación horizontal y de un coeficiente que depende a su vez del porcentaje de vehículos pesados entre otros factores. En el apartado 5 se describe como calcular la velocidad media en campo, para ello se debe de promediar la velocidad puntual observada en la salida del segmento durante al menos una hora.
- **Porcentaje de vehículos en cola (%VC).** Para esta medida de desempeño se definen unas ecuaciones de cálculo que dependen del volumen de vehículos motorizados direccional, y de un coeficiente de la pendiente del tramo y de otro coeficiente que a su vez dependen de los valores del porcentaje de vehículos en cola en los puntos correspondientes al 25% y al 100% de la capacidad. En el apartado 5 de este manual se describe como medir el porcentaje de vehículos en cola en campo. Esta medida de desempeño se debe de medir en la salida del tramo considerando todos los vehículos que pasan por este punto durante al menos una hora. Se calcula el intervalo de tiempo entre las partes frontales de los vehículos con precisión de segundos, el número de seguidores se calcula como la suma del número de intervalos de tiempo iguales o menores de 2.5 s. El porcentaje de vehículos en cola corresponde con el número de seguidores respecto el total de vehículos que han pasado por este punto de control.
- **Densidad de seguidores (FD).** Se define como el número de vehículos en estado de seguimiento por km por carril. Para su cálculo se define como el porcentaje de vehículos en cola multiplicado por la densidad de todos los vehículos en el punto de salida del tramo. Se utiliza como la única medida de desempeño en carreteras convencionales debido a su sensibilidad tanto a la demanda de tráfico como a la variabilidad en la geometría del tramo. en su cálculo interviene la densidad y el porcentaje de vehículos en cola, representando mejor así la calidad del servicio de la vía. Puede ser calculada en campo mediante el volumen de tráfico, el número de seguidores y la velocidad media observados en el punto final del tramo. El número de seguidores dividido entre la velocidad media del segmento proporciona la densidad de seguidores (ecuación 4):

$$FD = \frac{\%VC}{100} * \frac{v_d}{S} \quad (4)$$

Donde:

FD es la densidad de seguidores (seguidores/km/carril)

$\%VC$ es el porcentaje de vehículos en cola

v_d es el volumen direccional en el sentido de estudio (veh/h)

S es la velocidad media en el sentido de estudio(km/h)

La nueva metodología propuesta por el Transportation Research Board (2018) presenta una tabla con los umbrales que determinan el nivel de servicio de una carretera convencional según los valores de la densidad de seguidores (Tabla 4). Estos valores fueron seleccionados en base a observaciones y simulaciones, y se diferenciaron los umbrales según la velocidad límite del tramo de carretera considerando carreteras con velocidades límite elevadas (mayores o iguales a 80.5 km/h) y carreteras con velocidades límite reducidas (menores a 80.5 km/h).

FD (seguidores/km/carril)		
LOS	Vel. límite ≥ 80.5 km/h	Vel. límite < 80.5 km/h
A	FD ≤ 1.243	FD ≤ 1.553
B	FD $> 1.243 - 2.485$	$> 1.553 - 3.107$
C	$> 2.485 - 4.971$	$> 3.107 - 6.214$
D	$> 4.971 - 7.456$	$> 6.214 - 9.321$
E	> 7.456	> 9.321
F	La demanda excede la capacidad	

Tabla 4. Valores del nivel de servicio de un tramo de carretera convencional según la velocidad límite del tramo (km/h) y la densidad de seguidores en la salida del tramo (seguidores/km/carril).

2.6 Conclusiones del estado del arte

Las elevadas cifras de siniestralidad ciclista en carretera registradas en los últimos años, y teniendo en cuenta que muchos de los accidentes registrados con ciclistas implicados se deben a interacciones con vehículos motorizados, ponen de manifiesto la necesidad de investigar estas interacciones. Una de las interacciones más frecuentes y peligrosas que se producen entre vehículos motorizados y ciclistas en carreteras convencionales es la maniobra de adelantamiento. Por tanto, analizar esta maniobra es esencial para entender el comportamiento de ambos usuarios de la vía con la finalidad de proponer medidas y recomendaciones que mejoren tanto la seguridad como la funcionalidad del tráfico en estas vías.

Los estudios anteriores sobre la maniobra de adelantamiento a ciclistas en carreteras convencionales ponen de manifiesto la necesidad de un estudio profundo sobre la maniobra de adelantamiento, basado en datos experimentales, que permita analizar tanto el comportamiento del vehículo adelantante como el de los ciclistas implicados, y que permita estudiar la maniobra en sí desde los momentos previos hasta los posteriores.

La metodología de tomas de datos mediante el uso de bicicletas instrumentadas permite recoger una muestra de maniobras de adelantamiento elevada, registrando un elevado número de variables relativas a la carretera, a los usuarios de la vía implicados y a la propia maniobra de adelantamiento. Sin embargo, esta metodología requiere un proceso de recolección y reducción de datos costoso.

En muy pocos de estos estudios previos se ha considerado la circulación de ciclistas en grupo, debiendo de ampliar el conocimiento en este ámbito. Estos estudios previos han sido enfocados, en su gran mayoría, desde el punto de vista de la seguridad, analizando principalmente la separación lateral entre vehículos motorizados y bicicletas. Sin embargo, la duración de la maniobra de adelantamiento no ha sido investigada previamente, y la afeción sobre la funcionalidad del tráfico producida por la presencia de ciclistas en carreteras convencionales tampoco se ha abordado en estas investigaciones anteriores.

La revisión de las investigaciones recientes en las que se realizan estudios de microsimulación del tráfico considerando bicicletas ha estado centrada en un entorno urbano, y en interacciones de bicicletas entre ellas en carriles exclusivos para uso de ciclistas. Por tanto, la microsimulación de tráfico mixto considerando vehículos motorizados y bicicletas en carreteras convencionales, donde los usuarios interactúan con los que circulan en sentido opuesto, no ha sido investigada, y los modelos de microsimulación de tráfico actuales no han sido adaptados a estas circunstancias. El uso de Aimsun Next con este fin es posible, sin embargo, requiere de adaptaciones del modelo para superar las limitaciones observadas a la hora de integrar a los ciclistas y a sus interacciones con los vehículos motorizados en carreteras convencionales.

En cuanto a las metodologías empleadas para caracterizar la funcionalidad del tráfico y el nivel de servicio de carreteras convencionales con presencia de ciclistas, se recalca la necesidad de medidas de desempeño específicas que caractericen la funcionalidad del tráfico considerado tanto vehículos motorizados como ciclistas, así como sus interacciones en este tipo de vías. La metodología descrita y las medidas propuestas por los documentos revisados no tienen en cuenta la presencia de ciclistas en la carretera, ni su afección a la funcionalidad del tráfico motorizado. Los ciclistas no pueden ser considerados como vehículos pesados, ya que su velocidad, volumen y comportamiento son muy diferentes. Por tanto, es necesario abordar el análisis de la funcionalidad del tráfico en carreteras con presencia de ciclistas proponiendo nuevas medidas de desempeño que se adapten a todos los usuarios presentes, y que incorporen el efecto limitante que la circulación de ciclistas tiene sobre la operación del tráfico en estas vías.

Por tanto, hasta el momento no se ha investigado la afección del tráfico ciclista sobre la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales, siendo esta investigación pionera en este ámbito.

Capítulo 3

Objetivos, hipótesis y alcance

Esta tesis tiene como objetivo principal analizar la afección sobre la funcionalidad del tráfico causada por la presencia de ciclistas en carreteras convencionales. Para ello es necesario basarse en la observación experimental de las interacciones entre tráfico motorizado y bicicletas, y revisar las medidas de desempeño que determinan la funcionalidad del tráfico en estas vías e incorporar nuevas medidas que representen mejor el fenómeno si es necesario.

Para alcanzar este objetivo principal se definen los siguientes objetivos específicos:

- El estudio de investigaciones anteriores relacionadas con el tráfico ciclista en carreteras convencionales y su influencia en la seguridad y la funcionalidad del tráfico en estas vías; así como una revisión de las normativas que regulan el tráfico ciclista.
- Observar las configuraciones habituales en las que circulan los grupos de ciclistas en las carreteras convencionales, así como la variación temporal de la demanda ciclista.
- Diseñar y desarrollar una metodología experimental que permita el estudio de la interacción entre bicicletas y vehículos motorizados en carreteras convencionales, especialmente durante la maniobra de adelantamiento. Esta metodología se basará en bicicletas instrumentadas con distintos dispositivos de medición y el posterior tratamiento de los datos registrados.
- Ejecutar las tomas de datos, utilizando la metodología desarrollada, en diferentes tramos de carreteras convencionales y considerado diferentes configuraciones del grupo de ciclistas, tanto del número como de la disposición en línea y en paralelo, obteniendo una muestra suficiente de datos relativos a maniobras de adelantamiento.
- Realizar el análisis descriptivo de la maniobra de adelantamiento y de todos los factores que intervienen en ella y que han sido obtenidos mediante el estudio experimental.
- Desarrollar un modelo de la duración del adelantamiento a grupos de ciclistas considerando factores relativos a la carretera, al grupo de ciclistas y a la propia maniobra de adelantamiento.
- Desarrollar una metodología de toma de datos que permita caracterizar la operación del tráfico en tramos de carretera convencional con tráfico ciclista, obteniendo las variables necesarias y los escenarios de tráfico observados.
- Adaptar un modelo de microsimulación del tráfico a la circulación de ciclistas tanto individuales como en grupo, y a su interacción con los vehículos motorizados. Este modelo se calibrará y validará con las observaciones realizadas en los diferentes tramos de carretera, y permitirá simular diferentes escenarios, tanto de tráfico como geométricos, para evaluar la funcionalidad del tráfico en diferentes condiciones.
- Revisar las medidas de desempeño que se utilizan en la metodología actual para caracterizar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales, y proponer medidas de desempeño que expliquen mejor el fenómeno si es necesario. Se analizará la variación de cada medida de desempeño según varíe la demanda ciclista.

Esta investigación pretende caracterizar la interacción entre vehículos motorizados y bicicletas en carreteras convencionales, en especial la maniobra de adelantamiento a bicicletas. Son muchas las hipótesis que pueden plantearse relacionadas con el adelantamiento a ciclistas debido a la gran cantidad de factores que pueden influir en el fenómeno. En esta investigación, además, al contemplar la posibilidad de que los ciclistas circulen en grupo, el número de hipótesis es mayor.

Las hipótesis que se contrastarán mediante el desarrollo de la tesis son:

- **H1:** La metodología de toma de datos mediante bicicletas instrumentadas permite obtener las variables necesarias para caracterizar la maniobra de adelantamiento a ciclistas.
- **H2:** La sección de la carretera influye en el tipo de maniobra de adelantamiento, registrándose un mayor número de maniobras lanzadas en secciones más favorables, con mayores anchos de carril y arcén. En secciones desfavorables, con arcenes estrechos o nulos, el número de maniobras en seguimiento será mayor.
- **H3:** En secciones desfavorables la invasión del carril opuesto es mayor, ya que los conductores deben de asegurarse que no hay vehículo en sentido opuesto para realizar la maniobra.
- **H4:** El nivel actual de cumplimiento de la normativa respecto a la separación mínima de 1.5 m requerida para adelantar a ciclistas es elevado.
- **H5:** En carreteras con secciones menos favorables, los ciclistas circulan mayoritariamente en línea.
- **H6:** Los adelantamientos realizados a un pelotón son más seguros que a un ciclista aislado, presentando mayores separaciones y menores velocidades del adelantante.
- **H7:** La duración del adelantamiento es mayor para grupos formados por más ciclistas y para la configuración en línea de los grupos.
- **H8:** Carreteras con velocidad límite e IMD mayores presentan duraciones del adelantamiento menores.
- **H9:** La circulación en pelotón aumenta los adelantamientos en rectas, reduciéndolos en curvas, en comparación con un ciclista aislado.
- **H10:** La duración del adelantamiento en rectas es menor que en curvas.
- **H11:** La visibilidad de los vehículos en sentido opuesto puede influir en la elección de la estrategia de adelantamiento. Cuando el vehículo opuesto sea visible el conductor realiza las maniobras con seguimiento previo.
- **H12:** Los pelotones de ciclistas en tramos sin pendiente, circulan como un solo vehículo, ya que los miembros del grupo circulan a la misma velocidad.
- **H13:** La presencia de ciclistas reduce la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados.
- **H14:** Las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios se ven más afectadas por la presencia de ciclistas que las relacionadas con la velocidad.
- **H15:** Cuando los ciclistas circulan en línea su afección sobre la funcionalidad del tráfico es mayor que cuando lo hacen en paralelo.

En el desarrollo de la tesis se han observado algunas limitaciones que han definido el alcance de esta:

- El estudio de adelantamientos a ciclistas se ha restringido a tramos de carretera convencional con dos carriles, no se han considerado intersecciones ni tramos donde se disponga de carriles especiales.
- La observación de las maniobras de adelantamiento a ciclistas se ha realizado solo en carreteras convencionales del entorno de València.
- Las maniobras de adelantamiento a ciclistas analizadas en este documento han sido realizadas por vehículos motorizados ligeros. Para extender las conclusiones a vehículos pesados y motocicletas se debería obtener una muestra mayor de adelantamientos realizados por estos tipos de vehículos.
- Los tramos de carretera en los que se ha realizado el estudio son mayoritariamente tramos llanos o con pendientes reducidas.
- Los resultados de este estudio se limitan a la geometría y las características del tráfico de las carreteras donde se recogieron los datos, a los escenarios de tráfico diseñados, y también a los factores analizados.

Capítulo 4

Materiales y métodos

Esta tesis tiene como objetivo principal estudiar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas. En estas condiciones, la funcionalidad se puede ver afectada cuando los vehículos motorizados y las bicicletas interactúan. Las principales diferencias entre bicicletas y vehículos motorizados en estas vías radican en su velocidad, su volumen y su nivel de protección, siendo la maniobra de adelantamiento la interacción más frecuente y peligrosa que se da entre estos usuarios considerando este escenario longitudinal.

Por tanto, para llevar a cabo esta tesis es necesario obtener datos reales de las interacciones que se producen entre vehículos motorizados y bicicletas en las carreteras convencionales, en especial durante la maniobra de adelantamiento. Previamente se observó de qué manera circulan los ciclistas por este tipo de carreteras, determinando las configuraciones más habituales de circulación según localizaciones. Con la finalidad de obtener datos relativos a la maniobra de adelantamiento a nivel microscópico se ha diseñado y ejecutado una metodología de toma de datos basada en la circulación de bicicletas instrumentadas.

La duración del adelantamiento se ha considerado un factor clave en cuanto a su efecto en la seguridad y en la funcionalidad del tráfico. Por tanto, esta variable se ha analizado con especial interés, desarrollando un modelo predictivo de la duración del adelantamiento considerando factores relativos a la configuración de los grupos de ciclistas, a la carretera y a la propia maniobra de adelantamiento.

También fue necesario obtener datos de tráfico y de medidas de desempeño que caractericen la funcionalidad de este, considerando diferentes condiciones de secciones transversales y de tráfico, tanto de bicicletas como de vehículos motorizados. Con este fin se ha diseñado y realizado una metodología de toma de datos simultáneos en los extremos de tramos de carretera convencional con presencia de ciclistas.

Basándose en los datos observados, se ha modelado el fenómeno en un microsimulador de tráfico, adaptándolo a la circulación de ciclistas y a su interacción con los vehículos motorizados, y se ha calibrado y validado con los datos observados en campo, considerando la circulación de los grupos de ciclistas en línea y en paralelo. La duración del adelantamiento se ha utilizado para calibrar las longitudes equivalentes de los diferentes grupos de ciclistas en el microsimulador de tráfico.

Para caracterizar la funcionalidad del tráfico es necesario utilizar medidas de desempeño que consideren la circulación de ciclistas y su efecto, con este fin se han seleccionado las medidas de desempeño más adecuadas. Finalmente, se ha analizado la afección de la demanda ciclista sobre la funcionalidad del tráfico, a partir de datos observados en dos tramos de carretera convencional, y a partir del uso del microsimulador de tráfico, simulando diversos escenarios de tráfico diseñados variando la demanda ciclista y motorizada.

4.1 Metodología para el análisis de la maniobra de adelantamiento

Para poder analizar la maniobra de adelantamiento en profundidad es necesario basarse en datos observados en las carreteras. En este apartado se desarrolla una metodología de toma de datos reales en carreteras convencionales a partir de recorridos realizados con bicicletas instrumentadas. Primeramente, se explica el desarrollo experimental de esta metodología, seguidamente se explica la ejecución experimental de estas tomas de datos, y finalmente se describe el proceso de reducción de los datos necesario para obtener las variables de estudio que permitirán caracterizar la maniobra de adelantamiento.

A partir de los datos obtenidos de las observaciones en campo se ha desarrollado un modelo de la duración del adelantamiento, considerando factores relativos a la carretera, al grupo de ciclistas adelantado y a la propia maniobra de adelantamiento.

4.1.1 Diseño experimental: datos de maniobra de adelantamiento

Con el fin de obtener datos de maniobras de adelantamientos de vehículos motorizados a bicicletas, circulando tanto individualmente como en grupo, se ha diseñado una metodología que permita recopilar un número suficiente de variables influyendo mínimamente en el comportamiento natural de estos usuarios en la carretera.

Esta metodología se basa en la circulación, por los tramos de estudio, de bicicletas instrumentadas con el fin de recoger datos de las interacciones entre los vehículos motorizados y las bicicletas.

En el diseño experimental de estas tomas de datos se define la instrumentación de las bicicletas, las configuraciones en las que los ciclistas recorrerán los tramos y las condiciones y limitaciones propias de esta metodología de toma de datos.

4.1.1.1 Instrumentación de las bicicletas

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) dispone de tres bicicletas de carretera que fueron instrumentadas de manera que pudiesen recopilar datos durante su circulación por los tramos de estudio.

Parte de la instrumentación consistió en la colocación de dos cámaras de tamaño reducido de la marca Garmin Virb Elite (Figura 19). Sus funciones principales consisten en el registro de ruta GPS y grabación de vídeo con sonido en alta definición, resolución de 1080p, y 30 fotogramas por segundo, durante períodos aproximados de 2 horas. Las cámaras disponen de una pantalla a color de 1.4" que permite verificar que la grabación se realiza de manera correcta, así como acceder a la configuración del dispositivo. Para el correcto funcionamiento de las cámaras estas deben de sincronizarse para obtener datos de registro de las rutas GPS.



Figura 19. Cámaras Virb Elite de Garmin utilizadas en las tomas de datos.

Una de las cámaras se situó en la parte trasera de la bicicleta, con el fin de obtener registros de la aproximación del vehículo adelantante, del posible seguimiento y del inicio de la maniobra. La segunda cámara se situó en el manillar de la bicicleta, registrando así el final de la maniobra

de adelantamiento y el regreso a su posición natural en el carril del vehículo adelantante. Esta cámara frontal también registró datos de los vehículos que circulan en sentido opuesto. Gracias a la elevada calidad de estas grabaciones, se caracterizó el entorno en el que se registró cada maniobra de adelantamiento a partir de la visualización de los vídeos, registrando variables relativas a los vehículos adelantantes y a la propia vía.

Estas bicicletas también fueron equipadas con un velocímetro/distanciómetro láser de la marca TruSense T200/T100 que permite obtener la velocidad con una frecuencia de 50 Hz. El dispositivo se compone de 2 módulos, T200 y T100, interconectados entre sí, permitiendo la medición de la distancia de separación lateral y de la velocidad del vehículo adelantante cuando circula en paralelo con la bicicleta (Figura 20). También se obtienen datos de tiempo de paso de los vehículos y longitud a su paso frente al dispositivo. Este dispositivo necesita baterías de 12 V para su alimentación, y un data logger que permite almacenar los datos registrados en una tarjeta SD.



Figura 20. Módulos del velocímetro láser TruSense T100/T200.

Los velocímetros T200 y T100 se colocaron en los portaequipajes delantero y trasero, respectivamente. Además, en el portaequipaje trasero se incluyen el resto de los elementos necesarios para el funcionamiento del conjunto (baterías y data logger), así como, el soporte para la cámara. Los dos módulos del velocímetro se ubican de modo que queden posicionados a la misma altura, y se configuran para que registren velocidades teniendo en cuenta la distancia que existe entre ambos. Para registrar la distancia lateral a la que se produce la maniobra de adelantamiento, y teniendo en cuenta las dimensiones de la sección transversal en los tramos de estudio; el láser se ha configurado con una distancia máxima de alcance de 4 metros.

En la Figura 21 se muestra la bicicleta totalmente instrumentada con todos los dispositivos.



Figura 21. Bicicleta totalmente instrumentada.

La instrumentación de las bicicletas de carretera fue llevada a cabo en el Laboratorio de Tráfico del GIIC. Todos los elementos han de quedar anclados con seguridad a la bicicleta, por lo que se emplearon bridas, tanto metálicas como de nylon. De este modo, se consiguió que la instrumentalización quedara compacta y no supusiera una molestia para el usuario, y fuese lo más discreta posible con el fin de pasar desapercibida para los otros usuarios de la vía.

4.1.1.2 Configuraciones de los grupos de ciclistas

Con el fin de caracterizar el tráfico ciclista previamente a las tomas de datos con bicicletas instrumentadas, se realizaron observaciones en diferentes tramos de carreteras convencionales. Estas observaciones consistieron en grabaciones naturalísticas de corta duración, en las que las cámaras no son percibidas por los usuarios de la vía y por tanto su comportamiento no se ve afectado por la toma de datos.

A partir de estas grabaciones se ha caracterizado el tráfico ciclista observado, identificando las diferentes configuraciones que adoptan los grupos de ciclistas y el uso que hacen de la vía en cuanto a su posición en la calzada. Los aforos de ciclistas realizados han permitido caracterizar, de una manera inicial sin entrar en modelos más complejos, la intensidad ciclista en las zonas de estudio determinando las franjas diarias y horarias de máxima afluencia ciclista.

Todos estos resultados de observaciones directas realizadas in situ en diferentes tramos de carreteras convencionales han servido para diseñar, organizar y planear las tomas de datos en las que se han utilizado bicicletas instrumentadas en cuanto a la selección de los tramos de estudio, la determinación de las configuraciones de los grupos ciclistas a estudiar y su posición en la calzada. También han servido para concretar los días y horas en las que se han realizado las pruebas según la variabilidad temporal de la demanda ciclista observada.

En estas observaciones previas, se seleccionaron cuatro puntos de control localizados en carreteras con diferentes secciones transversales, y se tomaron datos de aforo de ciclistas en estos puntos, registrando el tiempo de paso, el número de ciclistas que formaban los grupos y su configuración en línea o en paralelo. En la Tabla 5 se muestran las localizaciones seleccionadas, las duraciones de las tomas de datos y el total de ciclistas observados en cada punto.

Localización	Sección	Duración	Ciclistas observados Sentido1/Sentido2	Configuraciones		
	calzada/plataforma (m)			Ind.	Línea	Paralelo
CV-424 PK 9+000	7.0/7.6	2 h 15 min	81/54	21%	17%	62%
CV-422 PK 9+000	4.5/5.0	3 h 30 min	34/44	31%	13%	56%
CV-315 PK 14+300	7.0/12.4	4 h 38 min	87/85	45%	26%	30%
CV-500 PK 8+000	6.0/9.0	4 h 22 min	151/118	28%	43%	28%
Total		22 h 22 min	530/448			

Tabla 5. Resultados de las observaciones naturalísticas para el análisis de la circulación de grupos de ciclistas.

Se puede concluir a partir de las observaciones de circulación de los grupos ciclistas que, en las secciones más desfavorables, con arcenes nulos o estrechos, los grupos de ciclistas circularon generalmente en paralelo, mientras que, en secciones más favorables, con arcenes iguales o mayores de 1.5 metros transitables por los ciclistas, estos circularon por el arcén, y cuando lo hicieron en grupo circularon mayoritariamente en línea. Sin embargo, las configuraciones en las que circulan los ciclistas no dependen solamente de la sección de la carretera, también

dependen de la intensidad del tráfico existente y de otros factores relacionados con el tráfico y la geometría de la carretera.

A partir de estas observaciones se decidió que los grupos de ciclistas considerados en las tomas de datos con las bicicletas instrumentadas debían de abarcar una variabilidad elevada en cuanto al tamaño del grupo, y para cada tamaño del grupo se debían de estudiar las configuraciones en línea y en paralelo permitidas por el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003).

Por tanto, para llevar a cabo las tomas de datos con las bicicletas instrumentadas se han considerado siete configuraciones de los grupos de ciclistas que recorrerán los tramos de estudio. Estas configuraciones se muestran en la Figura 22, y difieren en el número de ciclistas que forman el grupo, considerando desde un ciclista individual a grupos de tamaño pequeño y mediano, formados por dos y cuatro ciclistas, y finalmente un grupo más grande formado por diez ciclistas. Cada uno de estos grupos de ciclistas ha circulado en línea y en paralelo.

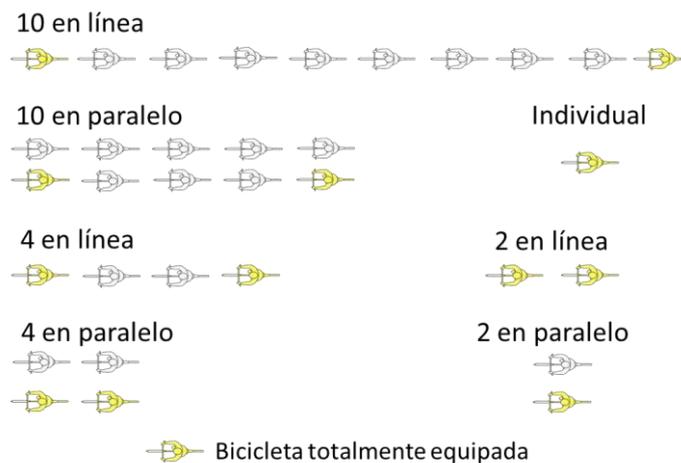


Figura 22. Configuraciones de los grupos de ciclistas utilizadas en las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.

Estas configuraciones representan una variabilidad, en cuanto al tamaño del grupo de ciclistas y a su circulación en línea y en paralelo, que permitirá obtener resultados y analizarlos determinando la influencia de la configuración del grupo de ciclistas en ellos.

Cada una de las bicicletas utilizadas en el estudio fue equipada con una videocámara situada en el sillín de la bicicleta, esta video cámara lleva un GPS incorporado que permitió conocer la posición y la velocidad de la bicicleta en cada momento. Las bicicletas situadas en los extremos del grupo, y en la parte interior del carril, correspondientes a las posiciones más cercanas a los vehículos adelantantes en el inicio y fin de la maniobra, fueron totalmente instrumentadas mediante las dos cámaras situadas en las posiciones frontal y trasera y el dispositivo láser que proporcionó datos de velocidades del adelantante y separaciones laterales durante la maniobra de adelantamiento. Estas bicicletas totalmente instrumentadas se muestran en la Figura 22 resaltadas en amarillo.

Las tomas de datos se llevaron a cabo mediante sucesivos recorridos del tramo de estudio por parte de los ciclistas, circulando en cada recorrido en una configuración del grupo especificada por el equipo de investigación.

4.1.1.3 Condicionantes y limitaciones de las tomas de datos

El diseño de la metodología de toma de datos mediante el uso de bicicletas instrumentadas estuvo sujeto a una serie de condicionantes.

Uno de los requisitos que debe de cumplir esta metodología es que se tienen que obtener datos naturalísticos del fenómeno estudiado. Para ello es necesario asegurar que la instrumentación de las bicicletas pasa desapercibida por el resto de usuarios de la vía, con el fin de que los vehículos que interaccionen con ellas lo hagan de manera natural. La circulación de las bicicletas instrumentadas por los tramos de carretera debe de ser natural y similar al resto de bicicletas que circulan por el tramo.

Respecto a la configuración de los grupos de ciclistas, se requirió a los ciclistas participantes en las pruebas que circularan manteniendo la configuración del grupo indicada en cada momento por el equipo investigador, y al mismo tiempo que mantuvieran, en la medida de lo posible, una posición vertical de las bicicletas y en paralelo con los vehículos adelantantes para registrar correctamente los datos de velocidad y separación lateral durante la maniobra de adelantamiento.

Los períodos de tiempo en los que se realizaron las tomas de datos también fueron un condicionante de estas. A partir de las observaciones previas realizadas en los tramos de carretera con presencia de ciclistas se determinó que los ciclistas individuales y los grupos pequeños circulaban preferentemente en días laborables, mientras que los grupos más grandes, correspondientes a salidas de las peñas ciclistas, solían circular en fin de semana.

La realización de estas tomas de datos supone la circulación de las bicicletas por diferentes tramos de carretera convencional. Por tanto, para poder realizar grabaciones en vías públicas es necesario obtener la autorización del titular de la vía. Del mismo modo, para realizar grabaciones de los usuarios de las vías es necesario obtener la autorización de la Dirección General de Tráfico, e informar a la Agrupación de Tráfico de la Guardia Civil a efectos oportunos.

Otro condicionante observado en el desarrollo de esta metodología fue la necesidad de disponer de un seguro para los ciclistas participantes en el estudio, debido a la peligrosidad que supone la circulación de ciclistas por carreteras con tráfico motorizado. Para resolver este asunto se contrató a los ciclistas participantes mediante la fundación Servipoli de la Comunitat Valenciana. Servipoli ofreció la posibilidad de contratar estudiantes de la Universitat Politècnica de València con experiencia en ciclismo de carretera, dotándoles de un seguro en caso de que ocurriese algún accidente en la carretera.

Las limitaciones previstas en el desarrollo de esta metodología de toma de datos consisten principalmente en dos tipos, las propias relativas al equipo material empleado y las correspondientes al equipo humano.

El equipo material empleado en las tomas de datos depende en gran medida de las duraciones de las baterías de las cámaras de grabación y de los dispositivos láser. El factor limitante en este aspecto son las duraciones de las baterías de las cámaras de grabación, las cuales disponen de una duración media de 2 horas, mientras que las baterías de los velocímetros tienen una duración media de 4 horas. Por tanto, las tomas de datos deben de adaptarse a las duraciones de las baterías, influenciando en la elección de los tramos de estudio en cuanto a su longitud.

Otra limitación evidente en el desarrollo de estas tomas de datos es la resistencia física del equipo de ciclistas que realizan el experimento. Este factor también limitará la duración de las

tomas de datos. Así, la elección de la longitud de los tramos de estudio se verá influenciada por las limitaciones del equipo material y personal.

La propia metodología en sí también presenta algunas limitaciones. Una de ellas es que, al basarse solamente en la bicicleta instrumentada, no ofrece datos de la percepción del conductor del vehículo adelantante. La toma de datos viene condicionada por los ciclistas que realizan el experimento. Estos deben de tener práctica y habilidad suficiente para realizar las pruebas con garantías de seguridad y naturalidad. Durante las pruebas se ha contado con diferentes grupos de ciclistas para realizar los recorridos, así los datos no dependen de las condiciones del mismo grupo de ciclistas, representando mejor la variabilidad de la población ciclista.

Por otra parte, para llevar a cabo las tomas de datos es necesario disponer de medios para realizar las reparaciones que puedan surgir en campo con respecto a la instrumentación de las bicicletas, así como a las propias bicicletas. Para realizar las tomas de datos es necesaria una planificación, ya que se debe de desplazar el equipo material y personal a los puntos de estudio en campo, debiendo de alquilar furgonetas suficientemente grandes para poder transportar todas las bicicletas y a todo el equipo, tanto investigador como de ciclistas.

4.1.2 Ejecución experimental

Las tomas de datos experimentales tienen una elevada importancia en el desarrollo de esta tesis, ya que los datos obtenidos en ellas han dado lugar a los resultados y las conclusiones de la investigación. Esta tesis se ha basado en datos observados, y las tomas de datos se han ejecutado con el fin de abarcar una variedad de tramos de carretera y de configuraciones de los grupos de ciclistas elevadas.

En este apartado se describen los tramos de carretera seleccionados para llevar a cabo las observaciones, así como el calendario de las tomas de datos y la ejecución de las tomas de datos considerando cada una de las configuraciones de los grupos de ciclistas descritas.

4.1.2.1 Selección de los tramos de estudio

En la selección de los tramos de estudio para realizar los recorridos con las bicicletas instrumentadas se tuvieron en cuenta dos fuentes de información. Por una parte, se consultaron los mapas de calor proporcionados por la plataforma Strava. Strava es una aplicación deportiva ampliamente utilizada por ciclistas en todo el mundo. En la actualidad es la APP que tiene un mayor peso, mayor crecimiento y potencial; dado que combina el deporte con el componente social Strava. Esta plataforma ofrece un mapa de calor en el que se muestran las rutas con mayor actividad registrada por los ciclistas usuarios de la plataforma (Figura 23). Utilizando el mapa de calor se observó la existencia de numerosas carreteras con presencia ciclista.

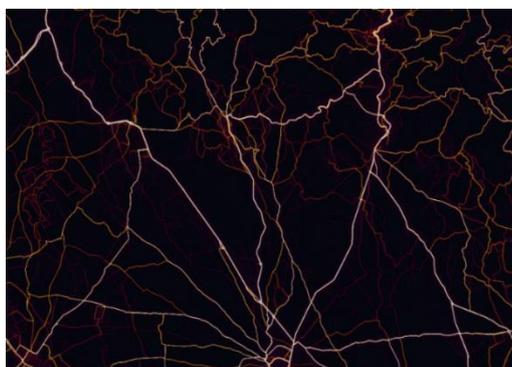


Figura 23. Ejemplo de rutas ciclistas en el entorno de Valencia del mapa de calor de Strava.

El siguiente paso consistió en seleccionar zonas concretas con rutas ciclistas que tengan una demanda representativa; para ello, además de utilizar la herramienta Strava, se realizaron entrevistas a peñas ciclistas. Las peñas ciclistas proporcionaron una información complementaria de cara al establecimiento concreto de los tramos de estudio.

En la elección de los tramos de estudio también se tuvo en cuenta la variabilidad de estos tramos en cuanto al tráfico motorizado y a las características geométricas de cada uno de ellos, intentando que se abarcara una variabilidad elevada para poder analizar las interacciones entre ciclistas y conductores.

El estudio se realizó en cinco tramos de carretera convencional situados en la provincia de València (Figura 24). Estos tramos presentan un elevado tráfico ciclista observado en los aforos previos, y forman parte de las principales rutas de las peñas ciclistas consultadas.



Figura 24. Localización de los tramos de estudio de las bicicletas instrumentadas.

En la elección de estos tramos se ha considerado el tráfico ciclista, basándose en un estudio de demanda ciclista que se llevó a cabo por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras, verificando que los tramos de estudio pertenecen a rutas ciclistas con elevada demanda. Se han seleccionado tramos con tráfico suficiente y con longitud razonable para garantizar el registro de un número suficiente de maniobras de adelantamiento, considerando la autonomía de los dispositivos utilizados.

En la Figura 24 se observa una variabilidad en cuanto a los anchos de carril y arcén, considerando carreteras estrechas como la CV-502 donde el arcén es inexistente y otras con sección transversal más favorable, como la CV-310 donde el arcén además está coloreado de rojo. De estos cinco tramos de estudio, cuatro de ellos pertenecen a las carreteras con más accidentes ciclistas registrados en el periodo 2014-2017 (Generalitat Valenciana, 2017). A continuación se describen las características principales de cada uno de estos tramos.

Tramo de la CV-500

Este tramo de carretera tiene una longitud de 15000 m, transcurre entre el PK 6+500 y el PK 21+500. Ambos extremos coinciden con sendas glorietas. Se trata de un tramo de carretera convencional llano, que transcurre paralelo a la playa. LA IMD de este tramo es muy elevada, alcanzando en 2018 los 16481 veh/día, siendo el porcentaje de pesados del 2.2% (Generalitat Valenciana, 2020b).

La sección transversal de este tramo dispone de un ancho de carril de 3.0 m y de un ancho de arcén de 1.5 m. En los primeros 650 metros del tramo existe un carril bici separado físicamente de la calzada principal que discurre por su margen izquierdo, acabando súbitamente debiendo de incorporarse los ciclistas que circulan por él a la calzada cruzando ambos carriles para proseguir su marcha como se observa en la Figura 25.



Figura 25. Sección transversal del tramo de carretera CV-500 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.

La presencia ciclista en este tramo es muy elevada, ya que enlaza la ciudad de València con zonas más montañosas situadas al sur.

Tramo de la CV-502

Este tramo de carretera está situado al sur del anterior. El tramo de estudio está situado entre el PK 1+300 y el PK 6+650, y tiene una longitud de 5350 m. El inicio del tramo se sitúa a la salida del núcleo urbano del Mareny de Barraquetes y finaliza en una glorieta que conecta con la CV-503. La IMD de este tramo fue de 4633 veh/día y el porcentaje de pesados fue del 1.5% en el año 2019 (Diputació de València, 2019).

Se trata de un tramo llano, paralelo a la playa en el que el ancho del carril es de 3.5 m y el arcén dispone de un ancho muy reducido siendo intransitable. En este tramo los ciclistas deben de circular por el carril (Figura 26).



Figura 26. Sección transversal del tramo de carretera CV-502 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.

La presencia de ciclistas en este tramo es elevada, tanto los días laborables como los fines de semana.

Tramo de la CV-310

Este tramo de carretera se encuentra ubicado en la CV-310 entre el PK 15+750 y el PK 10+000. El tramo comienza en una glorieta y finaliza en una intersección de tres patas. La longitud total del tramo es de 5750 m. La IMD de este tramo es de 6528 veh/día, con un porcentaje de pesados de 1,44% (Diputació de València, 2019).

La sección transversal de este tramo consiste en dos carriles con un ancho de carril de 3.2 m y un arcén de ancho variable entre 1.5 y 2.0 m. Una de las principales características de este tramo es que los arcenes están coloreados de rojo (Figura 27).



Figura 27. Sección transversal del tramo de carretera CV-310 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.

Este tramo forma parte de la ruta de acceso al puerto de montaña del Oronet, por tanto, presenta una elevada demanda ciclista en ambos sentidos de circulación.

Tramo de la CV-333

Este tramo de carretera convencional se encuentra situado en la CV-333 entre el PK 0+000 y el PK 7+500, contando con una longitud de 7500 m. El tramo comienza y finaliza en sendas intersecciones y cuenta con tres glorietas a lo largo de su longitud. La longitud total del tramo es de 7500 m. La IMD del año 2018 de este tramo fue de 3650 veh/día, con un porcentaje de pesados de 1,8% (Generalitat Valenciana, 2020b).

Se trata de un tramo con ancho de carril de 3.2 m y ancho de arcén de 1 m. dispone de una vía de servicio paralelo al tramo de estudio y separada por barreras como se observa en la Figura 28. En la primera parte del tramo existe un carril bici separado físicamente de la calzada.



Figura 28. Sección transversal del tramo de carretera CV-333 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.

Tramo de la CV-50

Este tramo de carretera está situado entre el PK 85+000 y el PK 76+000, y su longitud es de 9000 m. La IMD en el año 2018, cuando se tomaron la mayoría de los datos, fue de 4825 veh/día y el porcentaje de vehículos pesados del 5.8% (Generalitat Valenciana, 2020b).

El ancho del carril es de 3.5 m y el del arcén es de 1.5 m. Se trata de un tramo de carretera convencional con una sección transversal favorable (Figura 29).



Figura 29. Sección transversal del tramo de carretera CV-50 para las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.

4.1.2.2 Calendario de toma de datos

El calendario de tomas de datos se diseñó en base a las observaciones realizadas previamente a la realización de las pruebas en los tramos de estudio. Se comprobó que los grupos grandes de ciclistas efectúan las salidas conjuntas los fines de semana, mientras que los grupos pequeños y los ciclistas individuales realizan las salidas los días entre semana.

Por tanto, los fines de semana los conductores están más predispuestos a encontrarse grupos grandes de ciclistas por las carreteras. Esta información fue comprobada mediante entrevistas con las peñas ciclistas. Para obtener datos considerando el tráfico real con el que interaccionan cada grupo de ciclistas según su tamaño se realizaron las pruebas siguiendo el criterio observado en campo.

Las tomas de datos se realizaron en diferentes jornadas debido a la dificultad que comporta desplazar a los tramos de carretera todo el equipo material y humano necesario para desarrollarlas, siendo imposible abarcar dos tramos no colindantes en la misma jornada. El calendario de tomas de datos en el que se realizaron las pruebas en cada uno de los cinco tramos de estudio y según el número de ciclistas que participaron se muestra en la Tabla 6.

Toma	Grupo ciclistas	Zona estudio	Fecha	Día de la semana
1	10 ciclistas	CV-50	18 11 2017	Sábado
2	10 ciclistas	CV-50	19 11 2017	Domingo
3	10 ciclistas	CV-502	25 11 2017	Sábado
4	10 ciclistas	CV-500	25 11 2017	Sábado
5	10 ciclistas	CV-502	26 11 2017	Domingo
6	10 ciclistas	CV-500	26 11 2017	Domingo
7	10 ciclistas	CV-310	21 04 2018	Sábado
8	10 ciclistas	CV-333	21 04 2018	Sábado
9	10 ciclistas	CV-310	22 04 2018	Domingo
10	10 ciclistas	CV-333	22 04 2018	Domingo
11	4 ciclistas	CV-310	27 03 2019	Miércoles
12	4 ciclistas	CV-310	28 03 2019	Jueves
13	4 ciclistas	CV-333	28 03 2019	Jueves
14	4 ciclistas	CV-50	03 05 2018	Jueves
15	4 ciclistas	CV-50	04 05 2018	Viernes
16	4 ciclistas	CV-502	09 05 2018	Miércoles
17	4 ciclistas	CV-502	10 05 2018	Jueves
18	4 ciclistas	CV-500	15 05 2018	Martes
19	4 ciclistas	CV-310	24 05 2018	Jueves
20	4 ciclistas	CV-310	25 05 2018	Viernes
21	4 ciclistas	CV-333	31 05 2018	Jueves
22	4 ciclistas	CV-333	01 06 2018	Viernes
23	4 ciclistas	CV-500	15 05 2019	Miércoles
24	4 ciclistas	CV-502	16 05 2019	Jueves

Tabla 6. Calendario de tomas de datos realizadas con las bicicletas instrumentadas.

Las tomas de datos con las bicicletas instrumentadas se realizaron durante un total de 24 jornadas, durante las cuales se realizaron las tomas de datos cubriendo todos los tramos de estudio y con los ciclistas circulando en las siete configuraciones definidas en la Figura 22.

En cuanto al horario de las tomas de datos, se realizaron todas ellas durante horario de mañana ya que se comprobó que la mayoría de grupos grandes de ciclistas realizan las salidas sábados y domingos por la mañana, mientras que los ciclistas individuales y los grupos pequeños realizan las salidas mayoritariamente por la mañana, aunque por la tarde también se observó una demanda importante.

4.1.2.3 Desarrollo de las tomas de datos

Una vez diseñadas las tomas de datos y seleccionados los tramos de carretera en los que desarrollar el estudio se procedió a la selección de participantes en el experimento. Los participantes deben de ser ciclistas con experiencia en el ciclismo de carretera y preferiblemente con experiencia en circulación en grupo. Para la realización de las pruebas fueron equipados con ropa deportiva específica del ciclismo de carretera y con casco, ofreciendo una imagen similar al resto de ciclistas deportivos que circulan por estos tramos habitualmente. La velocidad de circulación de las bicicletas y su trayectoria y posición en la calzada se ha dejado libre a la elección de los ciclistas, según el tramo recorrido, ya que se ha contado con ciclistas que practican habitualmente este deporte y se ha confiado en su experiencia y en su circulación naturalística.

La contratación de los participantes se realizó a través de la fundación Servipoli de la Comunitat Valenciana, esta elección permitió contratar a estudiantes de la Universitat Politècnica de València con los requisitos de experiencia en ciclismo de carretera especificados. Debido a la peligrosidad asociada al propio experimento, en el que los ciclistas deben de circular por tramos de carretera e interactuar con el tráfico motorizado existente en estas vías, el proceso de

contratación permitió disponer de un seguro que cubriese a los participantes en el caso de que se produjese algún incidente durante el desarrollo de las pruebas.

Las tomas de datos con el grupo de diez ciclistas se realizaron en el marco del proyecto titulado “Medidas para la mejora de la seguridad vial en carreteras convencionales con bicicletas circulando en grupo (Safe4bikes)”, con referencia SPIP2017-02280, financiado por la Dirección General de Tráfico. Mientras que las tomas de datos con los grupos de cuatro ciclistas que abarcaron el resto de configuraciones con menor número de participantes se realizaron en el marco del proyecto “Mejora de la seguridad y operación de carreteras convencionales con ciclistas (Bike2lane)”, con referencia TRA2016-80897-R, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

Para el desplazamiento desde la Univeritat Politècnica de València hasta los tramos de estudio se requirió del alquiler de furgonetas suficientemente grandes para poder transportar todas las bicicletas y el material necesario, así como a todos los participantes, tanto a los ciclistas como al equipo investigador.

Las tomas de datos de los grupos de diez ciclistas se realizaron mediante recorridos de ida y vuelta del tramo en cada una de las dos configuraciones descritas, es decir, en línea y en paralelo. Se utilizaron las tres bicicletas totalmente instrumentadas del GIIC (Figura 30), las cuales se situaron en las posiciones inicial, central y final del pelotón, el resto de bicicletas fueron aportadas por los ciclistas participantes en el estudio y equipadas con cámaras (ver Figura 22).

En las tomas de datos en las que participaron cuatro ciclistas se diseñó una metodología con el fin de optimizar el tiempo y alternar a los ciclistas participantes con el fin de cubrir todas las configuraciones sin que ningún ciclista debiera de realizar un sobreesfuerzo. Las tomas de datos de los grupos de cuatro ciclistas se tomaron en días laborables por la mañana, alternando cada día a un grupo de cuatro ciclistas diferentes para cada zona de estudio, asegurando así la independencia de los datos obtenidos del mismo ciclista. En el estudio participaron tres grupos diferentes de cuatro ciclistas. El diseño de las tomas de datos se realizó de manera que todos los ciclistas hiciesen el mismo número de recorridos y de descansos, contando con que existen configuraciones de un solo ciclista, de dos y de cuatro circulando en línea y en paralelo. Para ello, los miembros del equipo de investigación se colocaron en los extremos de cada tramo, para poder indicar a los ciclistas que configuración y quienes de ellos debían de circular en cada recorrido. En los extremos de los tramos también se realizaron tareas de cambios de baterías y verificación del funcionamiento de todos los dispositivos. En cada recorrido se anotaron los tiempos de inicio y fin y las posibles incidencias registradas.



Figura 30. Ciclistas recorriendo los tramos con las bicicletas instrumentadas.

Al finalizar cada toma de datos se realizó un informe describiendo el desarrollo y las posibles incidencias. También se descargaron y archivaron todos los datos recogidos mediante todos los dispositivos utilizados.

4.1.3 Reducción de datos

El proceso de reducción y tratamiento de los datos recogidos mediante las bicicletas instrumentadas supuso una carga de trabajo elevada, ya que se procesaron las grabaciones realizadas desde todas las cámaras colocadas en todas las bicicletas que realizaron el estudio.

Durante las pruebas se han generado una serie de archivos en los que se ha almacenado la información recogida:

- Archivos de vídeo con las grabaciones de las cámaras delanteras y traseras de las bicicletas.
- Archivos de texto con la posición y la velocidad de la bicicleta por cada segundo generados por el GPS de cada una de las cámaras.
- Archivos de texto con los datos de distancias laterales y velocidades relativas de los vehículos adelantantes, y tiempos de paso de estos vehículos por el láser. Estos archivos se han generado para cada dispositivo láser utilizado.

A partir de estos archivos, y de su sincronización, se han obtenido las variables de estudio recogidas en la base de datos. Esta base de datos se va rellenando a partir de las visualizaciones de las grabaciones realizadas por las cámaras delanteras y traseras situadas sobre las bicicletas. Los datos se completan con los valores de las velocidades y distancias proporcionadas por los dispositivos láser, también situados sobre las bicicletas. Algunos datos son calculados a partir de otros, como la velocidad del vehículo adelantante y la separación lateral entre el vehículo adelantante y la bicicleta.

Para la visualización de los vídeos se ha utilizado el programa VIRB Edit de Garmin. Este programa permite cargar, para cada vídeo, los datos relativos a la posición y velocidad de la bicicleta registrados por el receptor GPS de las cámaras, y sincronizar estos datos de manera que se pueden ver a medida que avanza el vídeo. Todo esto se muestra en la Figura 31, en la que se ve una imagen de la cámara trasera y una de la delantera de la bicicleta.



Figura 31. Captura del software VIRB Edit de Garmin durante el proceso de reducción de datos.

Como ya se ha comentado, algunas variables no son medidas directamente por los dispositivos, sino que hay que calcularlas a partir de otras. Este es el caso de la velocidad del vehículo adelantante, que se calcula como la suma de la velocidad relativa proporcionada por el láser y la velocidad de la bicicleta proporcionada por el GPS.

Otra variable subrogada es la separación lateral existente entre el vehículo adelantante y la bicicleta. Esta separación lateral se entiende como la mínima distancia real que existe entre estos dos cuerpos, tomándose desde el extremo del manillar de la bicicleta hasta el extremo del retrovisor del vehículo adelantante, en el caso de que el retrovisor se encuentre a la altura de la bicicleta. Las distancias que proporciona el dispositivo láser son distancias entre el eje de la bicicleta, donde está colocado el láser, y el cuerpo del vehículo. Para conseguir la separación lateral neta se debe de restar a la distancia proporcionada por el láser (ver Figura 32):

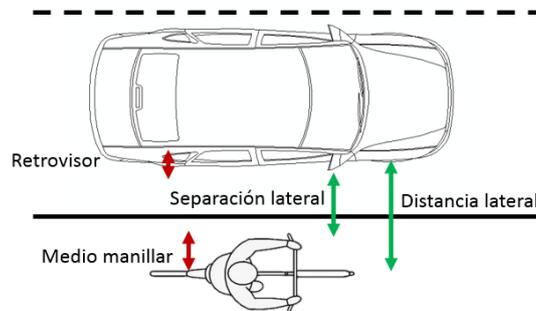


Figura 32. Esquema de las separaciones de referencia en la maniobra de adelantamiento.

A partir de la visualización de los vídeos y de la sincronización con los datos del dispositivo láser se completó la base de datos final en la que se incorporaron todas las variables obtenidas mediante esta metodología. En la Tabla 7 se muestran las variables que se han obtenido en la reducción de los datos y los valores que pueden tomar. Estas variables se han registrado para cada interacción del grupo de ciclistas con cada vehículo, tanto con los adelantantes como con los que circulaban en sentido opuesto.

Variable	Tipo de variable	Valores
Tramo de estudio	Categórica	CV-500 CV-502 CV-333 CV-310 CV-50
Configuración del pelotón	Categórica	Individual 2 línea 2 paralelo 4 línea 4 paralelo 10 línea 10 paralelo
Tipo de vehículo	Categórica	Ligero Pesado Motocicleta
Tipo de interacción	Categórica	Adelantante Opuesto
Línea de separación de carriles	Categórica	Continua Discontinua Otro
Tipo de maniobra	Categórica	Lanzado Seguimiento En grupo/cola
Alineación en planta	Categórica	Recta Curva derecha Curva izquierda Intersección/otro
Velocidad límite (km/h)	Continua	Métrica

Ancho carril (m)	Continua	Métrica
Ancho arcén (m)	Continua	Métrica
Pendiente	Catórica	Llano Ascendente Descendente
Invasión carril opuesto*	Catórica	Si No Total
Velocidad bicicleta* (km/h)	Continua	Métrica
Velocidad relativa* (km/h)	Continua	Métrica
Velocidad vehículo* (km/h)	Continua	Métrica
Distancia lateral* (m)	Continua	Métrica
Separación lateral* (m)	Continua	Métrica

Tabla 7. Variables de estudio obtenidas a partir de las bicicletas instrumentadas y valores.

*Estas variables se obtienen al inicio y al final de la maniobra de adelantamiento.

A partir de la visualización de los vídeos se registraron una serie de tiempo relativos a cada interacción de los ciclistas con los vehículos motorizados. La línea temporal de cada maniobra de adelantamiento registrada ha sido anotada a partir de la visualización de los vídeos grabados desde la cámara trasera de la última bicicleta y la delantera de la primera bicicleta.

Se han anotado los tiempos correspondientes a las distintas fases de la maniobra de adelantamiento, y a la presencia del vehículo opuesto (Figura 33):

- t_0 es el tiempo en el que el adelantante llega a la última bicicleta del grupo, corresponde cuando el adelantante se encuentra alrededor de 3 metros de la última bicicleta.
- t_i es el tiempo en que el vehículo adelantante inicia la maniobra de adelantamiento. Se indica como el momento en que el vehículo que adelanta cambia de trayectoria o, en el caso de adelantamientos lanzados sin un cambio de trayectoria claramente visible, es el momento en que el vehículo que adelanta llega a la última bicicleta del grupo.
- t_p es el tiempo en que el vehículo está en paralelo con la última bicicleta del grupo e inicia la fase de adelantamiento.
- t_p' es el tiempo en que el vehículo está en paralelo con la primera bicicleta del grupo e inicia la fase de retorno.
- t_f es el tiempo en que el vehículo finaliza el adelantamiento y vuelve a su posición natural en el carril, finalizando la fase de retorno.
- t_{ov} es el tiempo en que cada vehículo opuesto es visto por primera vez desde la cámara frontal de la primera bicicleta del grupo.

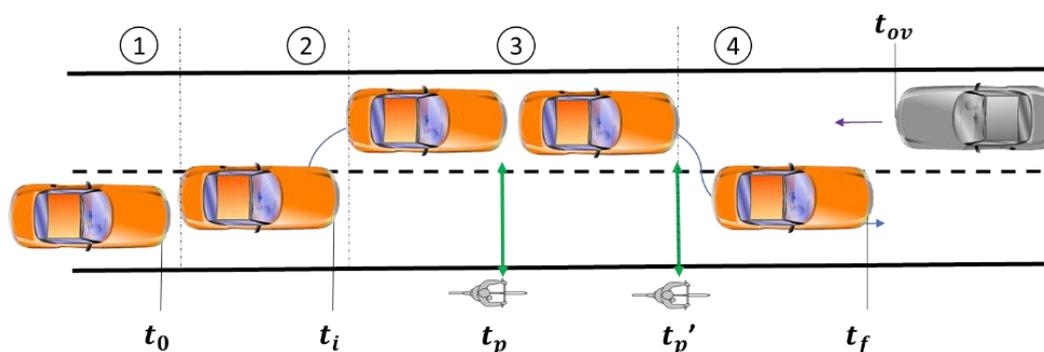


Figura 33. Línea temporal de la maniobra de adelantamiento a ciclistas. Se representan las cuatro fases de la maniobra: 1) aproximación, 2) inicio, 3) adelantamiento, 4) retorno.

La duración del adelantamiento se define como $OD=t_f-t_i$. Es el tiempo en el que el vehículo que adelanta realiza la maniobra de adelantamiento mediante las fases de inicio, adelantamiento y retorno a su carril.

El tiempo de seguimiento registrado en las maniobras en seguimiento corresponde a t_i-t_0 , de esa forma, las maniobras en seguimiento se definen cuando $t_0 < t_i$.

En las maniobras lanzadas, el adelantamiento comienza cuando el vehículo llega a las bicicletas ($t_0=t_i$), o en algunos casos, incluso antes de llegar a las bicicletas ($t_0 > t_i$).

Considerando el vehículo que se aproxima en sentido opuesto, para cada maniobra de adelantamiento si $t_{ov} < t_i$ se considera que la maniobra se realiza con la presencia de un vehículo opuesto.

Para los vehículos opuestos también se registraron los tiempos de cruce con la primera y la última bicicleta del grupo.

La reducción de los datos se realizó para cada tramo de estudio y para cada jornada de toma de datos, finalmente se unieron todas las interacciones registradas en una base de datos final a partir de la cual se realizó el análisis de los resultados obtenidos mediante esta metodología.

4.1.4 Modelo de duración del adelantamiento

A partir de los resultados obtenidos mediante las bicicletas instrumentadas se ha determinado que la duración del adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas es una variable clave que influye tanto en la seguridad vial, traduciéndose en el tiempo en el que el vehículo adelantante circula en el carril opuesto, como en la funcionalidad del tráfico, ya que mayores duraciones requieren una mayor visibilidad y por tanto pueden significar adelantamientos más complicados de realizar y un mayor tiempo en seguimiento de los ciclistas.

Para obtener la duración del adelantamiento a los ciclistas, es fundamental comprender el desarrollo de la maniobra de adelantamiento. La línea temporal de cada maniobra de adelantamiento se anotó considerando las cuatro fases definidas por Dozza et al. (2016): 1) aproximación, 2) inicio, 3) adelantamiento y 4) retorno. En el apartado de reducción de datos (apartado 4.7.3) se describen los diferentes tiempos anotados en cada maniobra de adelantamiento registrada y como se han obtenido las duraciones de la maniobra de adelantamiento a ciclistas.

Mediante la modelización de la duración del adelantamiento se pretende analizar qué factores influyen en la duración, y de qué manera lo hacen. Por otra parte, otra finalidad importante de este modelo es predecir la variable respuesta en observaciones diferentes a las realizadas en campo.

Las variables incluidas en la modelización de la duración del adelantamiento fueron registradas mediante las bicicletas instrumentadas para cada maniobra de adelantamiento, y se clasificaron de acuerdo con su relación con la carretera, el grupo de ciclistas adelantado y la propia maniobra de adelantamiento. Estas variables se muestran en la Tabla 8.

Descripción de la variable	Tipo de variable	Código de variable
Relacionada con la carretera		
Ancho de carril (m)	Continua	Lane
Ancho de arcén (m)	Continua	Shoulder
Velocidad límite (km/h)	Continua	Slimit
Intensidad media diaria (veh/día)	Continua	AADT
Relacionada con los ciclistas		
Número de ciclistas en el grupo	Continua	Cyclists
Configuración en línea o en paralelo	Catagórica	Conf
Relacionada con la maniobra de adelantamiento		
Alineación horizontal	Catagórica	Halign
Presencia de vehículo opuesto	Catagórica	OncVis
Velocidad del adelantante (km/h)	Continua	Ovspeed
Separación lateral (m)	Continua	Clearance

Tabla 8. Variables utilizadas en el modelo de duración del adelantamiento.

Los modelos de duraciones del adelantamiento desarrollados en investigaciones anteriores, para adelantamientos entre vehículos motorizados, utilizaron un análisis de supervivencia clásico, desarrollando modelos de duración basados en peligros para analizar la probabilidad de que una maniobra de adelantamiento termine (Bella y Gulisano, 2020; Vlahogianni, 2013). Sin embargo, el enfoque Bayesiano para el análisis de datos proporciona una forma poderosa de manejar la incertidumbre en todas las observaciones, en los parámetros y en la estructura del modelo utilizando la teoría de la probabilidad (Gelman et al., 2020).

Los métodos Bayesianos tienen varias ventajas sobre los enfoques frecuentistas, como la capacidad de derivar enunciados de probabilidad para cada cantidad de interés o incorporar explícitamente conocimientos previos sobre parámetros en el modelo (Bürkner, 2018). La

estadística Bayesiana estima la distribución posterior completa (conjunta) de los parámetros, que es mucho más informativa que estimar un solo punto, como en la estadística frecuentista clásica (Bürkner and Vuorre, 2019). Actualmente, los modelos bayesianos se utilizan cada vez más para superar las limitaciones de los enfoques frecuentistas y obtener modelos predictivos y descriptivos (Rasch et al., 2020a, 2020b).

Se utilizaron modelos de regresión Bayesiana para modelar la duración del adelantamiento considerando las diferentes variables relacionadas con cada maniobra. El software de R Project y el paquete *brms* para modelos Bayesianos multinivel, versión 2.14.4, se utilizaron para ajustar los modelos. El paquete *brms* viene con muchas funciones de posprocesamiento y visualización, que incluyen verificaciones predictivas posteriores, validación cruzada de dejar uno fuera (leave-one-out cross-validation LOOCV), la visualización de efectos estimados y la predicción de nuevos datos (Bürkner, 2018, 2017).

Los datos de duración de adelantamiento (OD) utilizados en este estudio presentaron valores no negativos y no censurados, ya que solo se registraron los eventos completados. Las distribuciones de respuesta más utilizadas para modelar duraciones son la Weibull y la log-normal, ya que a menudo se consideran para situaciones en las que se necesita una distribución sesgada para una variable aleatoria no negativa (Dumonceaux y Antle, 1973). En este estudio se utilizaron las distribuciones exponencial, Weibull y log-normal, que se compararon para obtener el modelo que mejor se ajusta a los datos.

Los parámetros de la distribución log-normal son la media log-normal $\mu_{OD,i}$, denominada el predictor, y la desviación estándar de la distribución log-normal σ_{OD} , que se supone constante en todas las respuestas. En la ecuación (5) se muestra la primera aproximación del modelo mediante la distribución log-normal con sus dos parámetros.

$$OD_i \sim Lognormal(\mu_{OD,i}, \sigma_{OD}) \quad (5)$$

El predictor contiene la i -ésima fila de la matriz de diseño, $X_{OD,i}$ y el vector de parámetros a nivel de población β_{OD} :

$$\mu_{OD,i} = X_{OD,i} \beta_{OD} \quad (6)$$

La matriz de diseño contiene en cada fila i los valores de los datos de cada efecto a nivel de población considerado. Dado que se han considerado diferentes modelos con diferentes efectos a nivel de población, el número de efectos a nivel de población F incluidos en cada modelo varía de 1 a k . Los efectos a nivel de población corresponden con los factores incluidos en cada modelo mostrados en la Tabla 8.

$$X_{OD,i} = [1 \ X_{F1,i} \ \dots \ X_{Fk,i}] \quad (7)$$

El vector de parámetros β_{OD} contiene los parámetros que se ajustarán para cada efecto a nivel de población considerado en cada modelo. β_0 representa la intersección del modelo y β_{Fk} corresponde al parámetro a ajustar para cada efecto incluido en cada modelo.

$$\beta_{OD} = [\beta_0 \ \beta_{F1} \ \dots \ \beta_{Fk}]^T \quad (8)$$

Para las distribuciones de respuesta exponencial y de Weibull, el predictor se transforma utilizando una función de enlace logarítmico y contiene la misma matriz de diseño y el vector de parámetros a nivel de población explicado anteriormente.

A partir de las diferencias entre las maniobras lanzadas y en seguimiento destacadas en estudios previos (Bianchi Piccinini et al., 2018; Farah et al., 2019; Rasch et al., 2020a), se ajustaron dos conjuntos de modelos, uno para maniobras lanzadas y otro para maniobras en seguimiento.

Para obtener el modelo que presente un mejor ajuste se diseñaron varios modelos variando los factores introducidos y la distribución de respuesta. Previamente se ajustaron modelos con menor número de factores, obteniendo en todos ellos peores ajustes. Los modelos diseñados que finalmente se ajustaron y se compararon sus resultados se muestran en la Tabla 9.

Estos ocho modelos, variando los factores y la distribución de respuesta, se ajustaron para cada uno de los tipos de maniobras de adelantamiento, lanzadas y en seguimiento. Por tanto, el ajuste de cada modelo se realizó a partir de una base de datos diferente, considerando los datos relativos a cada tipología de maniobra.

Factores	Modelos							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Lane	X	X	X	X	X	X	X	X
Shoulder	X	X	X	X	X	X	X	X
Slimit	X	X	X	X	X	X	X	X
Cyclists	X	X	X	X	X	X	X	X
Conf	X	X	X	X	X	X	X	X
AADT	X	X	X	X	X	X	X	X
Halign	X	X	X	X	X	X	X	X
OncVis	X	X	X	X	X	X	X	X
Ovspeed		X	X			X	X	X
Clearance				X	X	X	X	X
Distribución funcional	1	2	1	2	1	2	1	3

Tabla 9. Diseño de modelos de duración del adelantamiento considerando diferentes factores y distribuciones de respuesta. Distribución funcional: 1) log-normal; 2) Weibull; 3) exponencial.

En estos modelos, se consideraron diferentes efectos a nivel de población, correspondientes con los factores, y también se varió la distribución de la respuesta. El objetivo general fue determinar: 1) qué factores explican mejor las maniobras de adelantamiento y 2) qué distribución se ajusta mejor a estos datos.

Debido a su alto rango de valores, la variable de la intensidad media diaria (AADT) se estandarizó restando la media y dividiendo por la desviación estándar.

Los modelos deben de converger correctamente para considerarse ajustados. Para asegurar la convergencia se deben de obtener una muestra efectiva suficientemente extensa, obteniendo valores de Rhat iguales a 1. Si los valores de Rhat son considerablemente mayores a 1 significa que el modelo no ha presentado una convergencia suficiente, siendo necesario ejecutar más iteraciones y/o establecer distribuciones previas más fuertemente informativas.

Los modelos se ajustaron utilizando cuatro cadenas, cada una con 2000 iteraciones, de las cuales las primeras 1000 fueron de calentamiento para calibrar el muestreador y se descartaron, lo que dio lugar a un total de 4000 muestras posteriores. Se utilizaron distribuciones débilmente informativas de los parámetros (Bürkner, 2017). La convergencia de las cadenas y de las distribuciones posteriores se investigó visualmente a partir de los gráficos de trazas y de densidades de las distribuciones posteriores de cada parámetro.

Para evaluar los modelos y compararlos, se utilizó la validación cruzada bayesiana de dejar uno fuera (LOOCV) (Vehtari et al., 2017). LOOCV proporciona una estimación casi imparcial de la capacidad predictiva de un modelo dado y permite comparar diferentes modelos aplicados a los

mismos datos. Este método de evaluación de los modelos consiste en realizar una validación iterativa del modelo, considerando en cada iteración un solo valor para validar y el resto para ajustar el modelo.

La salida de LOO al comparar modelos en *brms* es detallada. Primero se resumen los valores de LOO individuales de cada modelo, y luego se presenta la comparación entre ellos. Una estimación más alta de la densidad predictiva logarítmica esperada (*elpd*) indica un mejor ajuste del modelo (Vehtari et al., 2017).

Un estadístico utilizado en este análisis es el R^2 bayesiano, el cual proporciona información para medir el rendimiento predictivo de cada modelo. Siguiendo el método descrito por Gelman et al. (2019), el R^2 bayesiano se define desde un punto de vista bayesiano como la varianza predicha dividida por la varianza predicha más la varianza del error. El R^2 bayesiano se puede considerar como una estimación basada en datos de la proporción de varianza explicada para nuevos datos.

$$\text{Bayesian } R^2 = \frac{\text{var}_{fit}}{\text{var}_{fit} + \text{var}_{res}} \quad (9)$$

En la ecuación 9, el numerador corresponde con la varianza de los valores predictivos modelados y representa la varianza entre las expectativas de los nuevos datos; mientras que var_{res} es la varianza residual modelada, que representa la varianza esperada para nuevos residuos, en ambos casos asumiendo los mismos predictores que en los datos observados.

Los modelos finalmente seleccionados se evaluaron adicionalmente con una validación cruzada de 10 iteraciones (10-fold cross-validation). Al utilizar este método, el conjunto de datos se dividió en diez subgrupos. El modelo se reajustó diez veces, considerando en cada reacondicionamiento nueve subgrupos para ajustar el modelo y el grupo restante para la predicción. Para cada reacondicionamiento se calculó el error cuadrático medio (RMSE) y se obtuvo el valor promedio considerando todo el proceso de validación.

El método de la validación cruzada de 10 iteraciones es un proceso iterativo en el que la muestra total se divide de forma aleatoria en 10 subgrupos de aproximadamente el mismo tamaño, de los que 10-1 se emplean para ajustar el modelo, y el restante se emplea para validarlo. El proceso se repite 10 veces, utilizando así todos los subgrupos para el ajuste y la validación del modelo. Para cada uno de estos 10 procesos de validación se calculó el error cuadrático medio (RMSE), y la media de estos 10 valores se consideró como el RMSE final de cada modelo. El RMSE se calculó mediante la programación correspondiente en el software R, la cual permitió calcular el RMSE de cada uno de los procesos de validación al comparar los valores obtenidos del modelo con los observados.

Una vez obtenidos los modelos que presentan mejor ajuste para cada tipo de maniobra, se analizó el efecto de cada factor en cada uno de estos modelos. Para ello representaron los gráficos de los efectos condicionales de cada uno de los factores introducidos en el modelo. En los gráficos de los efectos condicionales se observa el efecto sobre la variable respuesta de cada factor, considerando que los otros factores han tomado el valor promedio para factores cuantitativos, y el valor de referencia para los categóricos.

Los modelos ajustados para cada tipo de maniobra no solamente ofrecen información descriptiva, si no que pueden ser utilizados para realizar predicciones a partir de datos específicos de los factores considerados en cada modelo.

4.2 Metodología para el análisis de la funcionalidad del tráfico

Para el correcto desarrollo de la tesis es necesario obtener datos de campo que permitan caracterizar el tráfico motorizado y ciclista, y definir medidas de desempeño que sean capaces de mostrar correctamente el efecto del tráfico ciclista sobre la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales.

La microsimulación del tráfico es una herramienta que permite analizar la funcionalidad del tráfico a partir de simulaciones de escenarios considerando la geometría y el tráfico de la vía. Sin embargo, se requiere que el modelo de microsimulación esté debidamente adaptado a la circulación de ciclistas y a su interacción con los vehículos motorizados, así como que disponga de unos procesos de calibración y validación con datos observados, para asegurar que simula el fenómeno observado correctamente.

En este apartado se describe el diseño, la ejecución y la reducción de datos observados en los extremos de los tramos de carretera analizados con el fin de caracterizar el tráfico y la funcionalidad de este. Seguidamente se describe la adaptación del modelo de microsimulación de tráfico, y los procesos de calibración y validación con datos reales. Finalmente, se seleccionan las medidas de desempeño a utilizar para caracterizar la funcionalidad del tráfico en esta investigación.

4.2.1 Diseño experimental: tomas de datos en inicio y fin de tramo

La segunda metodología utilizada para recopilar datos en este estudio fueron las observaciones naturalísticas realizadas en los extremos de los tramos de carretera. Estas observaciones consistieron en realizar grabaciones simultáneas a la entrada y a la salida de tramos homogéneos de carretera, en los que no existieran entradas o salidas intermedias.

La finalidad de estas grabaciones es caracterizar el tráfico en estos puntos, y obtener datos del recorrido de cada usuario por el tramo de carretera, para estudiar la afección sobre la funcionalidad del tráfico que pueden causar los ciclistas a nivel macroscópico o de sección.

Las tomas de datos deben de abarcar un periodo de tiempo suficiente para obtener datos con diferentes intensidades ciclistas para poder observar y analizar el efecto de la presencia de ciclistas en la funcionalidad del tramo, cubriendo desde escenarios en los que la demanda ciclista sea nula hasta escenarios donde se registre una demanda ciclista elevada. Estas tomas de datos se deben desarrollar en diferentes tramos de carretera en los que se haya asegurado previamente la presencia de tráfico ciclista mediante observaciones in situ y/o entrevistas con las peñas ciclistas.

Esta metodología permitirá obtener escenarios de tráfico cubriendo diferentes intensidades tanto de ciclistas como de vehículos motorizados. Estos escenarios observados se utilizarán para caracterizar la funcionalidad del tráfico en estas circunstancias, y para calibrar y validar el modelo de microsimulación del tráfico a nivel macroscópico.

Mediante esta metodología también fue posible identificar patrones de variabilidad temporal de la demanda ciclista durante el periodo de toma de datos. También se obtuvieron las distribuciones de velocidades medias de recorrido de cada usuario por el tramo, que permitieron caracterizar las velocidades normalmente desarrolladas por estos usuarios.

Esta metodología de toma de datos se completó con aforos manuales de los usuarios registrados con el fin de completar la información registrada en las grabaciones, en cuanto al número de

ciclistas que forman los grupos, en los casos en los que las grabaciones necesiten alguna aclaración debido al solape de los ciclistas, sobre todo en los casos de grupos grandes.

4.2.1.1 Equipo empleado

Para la realización de grabaciones simultáneas en los extremos del tramo de estudio se utilizaron cámaras Virb Elite de Garmin mostradas en la Figura 19. estas cámaras se situaron de manera que fuesen desapercibidas por los usuarios de la vía, con el fin de recoger datos naturalísticos. estas cámaras permitieron obtener grabaciones continuas de todo el periodo de toma de datos, tanto en la entrada como en la salida del tramo. Al disponer de GPS interno, las cámaras se sincronizan automáticamente, reduciendo así el error debido al posible desfase horario debido a una sincronización errónea.



Figura 34. Disposición de las cámaras en las grabaciones en los extremos de los tramos de estudio.

Para la correcta colocación de las cámaras se emplearon trípodes y soportes que aseguraron la misma posición de las cámaras durante todo el periodo de grabación (Figura 34). Esto es necesario ya que en la reducción de los datos se utilizaron líneas de referencia para determinar los tiempos de paso de cada usuario en la entrada y salida del tramo de estudio.

4.2.1.2 Condicionantes y limitaciones de las tomas de datos

La finalidad de estas tomas de datos es obtener observaciones naturalísticas de la circulación de los diferentes usuarios por la vía. Para asegurar que los usuarios registrados se comportan normalmente y no están influenciados por el experimento, se colocaron las cámaras de manera que no fueran percibidas por los usuarios de la vía.

Para la realización de estas tomas de datos se dispuso de las correspondientes autorizaciones de la Dirección General de Tráfico, y se informó a la Agrupación de Tráfico de la Guardia Civil a efectos oportunos.

La principal limitación en el desarrollo de esta metodología de toma de datos fue la duración de las baterías de las cámaras utilizadas. Durante las tomas de datos se dispuso de suficientes cámaras y baterías para cubrir todo el periodo de toma de datos en cada punto de grabación. Se requirió la presencia de un investigador en cada punto de control para verificar el correcto funcionamiento de las cámaras y para realizar el cambio de baterías.

4.2.2 Ejecución experimental

La metodología de toma de datos de manera simultánea en los extremos de los tramos de estudio se llevó a cabo en tramos de carretera con diferentes características geométricas y de tráfico. En este apartado se describe la selección de los tramos de carretera y del calendario de tomas de datos, finalmente se realiza una descripción del desarrollo particular de estas tomas de datos en campo.

4.2.2.1 Selección de los tramos de estudio

La selección de los tramos de carretera en los que se llevó a cabo la metodología de toma de datos en los extremos del tramo se realizó a partir de observaciones previas, teniendo en cuenta que los tramos soportasen una elevada demanda ciclista y que presentasen diferencias en cuanto a su configuración geométrica. Finalmente se realizaron las tomas de datos en dos tramos de carretera convencional.

Tramo de la CV-502

El tramo de estudio de la CV-502 seleccionado inicialmente para realizar las tomas de datos se muestra en la Figura 35. Este tramo inicial cubre una longitud de 5285 m, iniciando en el PK 1+315 y finalizando en el PK 6+600. Este tramo dispone de una intersección intermedia, en la que no se esperaba registrar entradas ni salidas de usuarios, sin embargo, para comprobar este punto, se dispuso de cuatro puntos de control dividiendo el tramo inicial en dos subtramos homogéneos sin entradas ni salidas de usuarios. Así, se colocaron los equipos de grabación en el PK 1+315, en los dos puntos de entrada y salida de la intersección intermedia, y en el otro extremo del tramo correspondiente al PK 6+600.

En esta intersección intermedia, en principio, no se esperaban demasiadas entradas ni salidas de vehículos ni bicicletas. Después de revisar los vídeos se observó que la mayoría de los ciclistas no acceden ni salen del tramo por esta intersección, mientras que los vehículos motorizados sí se incorporan o abandonan el tramo en la intersección, por tanto, no se puede considerar el tramo entero como homogéneo, debiendo de estudiar cada subtramo por separado.

El subtramo de carretera que va desde la intersección hasta el PK6+600 incorpora en su recorrido una travesía que recorre la zona urbana del Mareny de Sant Llorenç, en la que los vehículos motorizados deben de reducir su velocidad.



Figura 35. Localización del tramo de la CV-502 seleccionado inicialmente para las tomas de datos en los extremos del tramo.

Debido a estas limitaciones y a problemas técnicos en las tomas de datos respecto a las grabaciones realizadas en el subtramo que va de la intersección intermedia hasta el PK 6+600, el tramo de estudio finalmente analizado fue el correspondiente desde el PK 1+315 hasta la intersección intermedia (PK 3+500), con una longitud de 2,185 m (Figura 36).

Se trata de un tramo de carretera convencional sin arcén, con un ancho de carril de 3.5 m, una IMD de 3544 veh/día y un porcentaje de vehículos pesados del 2.07% (Diputació de València, 2019). Discurre paralelo a la playa, y la pendiente es prácticamente nula en todo el tramo. Se trata de un tramo altamente frecuentado por ciclistas, tanto en días laborables como en fin de semana.



Figura 36. Localización y características del tramo de estudio de la CV-502 para datos en extremos del tramo.

Tramo de la CV-310

En la carretera CV-310 se tomaron datos seleccionando un tramo inicial desde el PK 9+550 hasta el PK 15+450, con una longitud total de 5900 m. Este tramo0 tiene una glorieta intermedia en la que en principio no se esperaba que abandonasen ni accediesen al tramo ni ciclistas ni prácticamente casi conductores. Sin embargo, para comprobar las posibles entradas y salidas en esta glorieta intermedia, se dispusieron tres puntos de control en los que se realizaron las grabaciones, dos de estos puntos fueron los extremos del tramo correspondientes a los PK 15+450 y 6+550, y el tercer punto de control se dispuso en la glorieta intermedia situada en el PK 14+450 (ver en la Figura 37).

Después de revisar los vídeos y de las observaciones in situ se comprobó que por la glorieta intermedia si existía un flujo de entradas y salidas sobre todo de vehículos motorizados, por tanto, el análisis se desarrolló individualmente para cada uno de los subtramos.



Figura 37. Localización del tramo de la CV-310 seleccionado inicialmente para las tomas de datos en los extremos del tramo.

El subtramo de carretera que va desde la glorieta intermedia hasta el PK 15+450 tiene una longitud de 1000 m, y está afectado por las dos glorietas situadas en sus extremos, las cuales reducen aún más la longitud efectiva en la que se pueden analizar las interacciones entre los usuarios. Por tanto, el análisis se llevó a cabo solamente en el subtramo más largo, situado entre los PK 9+550 y 14+450, con una longitud total de 4900 m.

Se trata de un tramo de carretera convencional de 4,860 metros de longitud, con un ancho de carril de 3.2 metros y un ancho de arcén variable entre 1.5 y 2 metros. Una característica importante que presenta este tramo es que el arcén está coloreado de rojo. Esta medida se tomó hace unos años como parte de un plan de mejoras para la circulación de ciclistas. La Figura 38 muestra la localización de este tramo de estudio, así como las características geométricas de la sección.



Figura 38. Localización y características del tramo de estudio de la CV-310 para datos en extremos del tramo.

4.2.2.2 Calendario de las tomas de datos

Las tomas de datos se realizaron en horario de mañana, ya que se comprobó a partir de observaciones previas que los ciclistas suelen circular en este horario, sobre todo en fin de semana. La Tabla 10 muestra las jornadas en las que se llevaron a cabo las tomas de datos en los extremos de los tramos de carretera seleccionados.

La primera toma de datos se realizó en el tramo de la CV-310, un jueves por la mañana, concretamente el 13 de junio de 2019. En esta jornada se registraron muy pocos ciclistas debido a las condiciones meteorológicas adversas, ya que se registró un viento bastante fuerte durante la mañana. Por tanto, esta jornada de toma de datos fue descartada debido a los pocos ciclistas registrados.

La segunda toma de datos se realizó en el tramo de la carretera CV-502. Esta jornada de toma de datos correspondió con un martes por la mañana, la hora de inicio de las grabaciones fue a las 8:50, y la hora de fin a las 12:14. También se grabaron diversos recorridos con coche flotante. Este día se registró una intensidad ciclista suficiente para poder obtener una muestra amplia y unos resultados representativos.

La tercera toma de datos se realizó en el tramo de carretera de la CV-310, un sábado de octubre. En esta jornada sí se registró un número elevado de ciclistas lo que permitió caracterizar la demanda ciclista y obtener escenarios considerando variaciones tanto en la demanda de ciclistas como en la motorizados.

Tramo	Fecha	Hora inicio	Duración	Datos
CV-310	13/06/2019	9:00	3 horas	Se registraron pocos ciclistas
CV-502	18/06/2019	9:10	3 horas	Suficientes
CV-310	19/10/2019	8:20	4:30 horas	Suficientes

Tabla 10. Calendario de toma de datos en los extremos de los tramos de estudio.

La duración de estas tomas de datos fue la necesaria para registrar una muestra suficientemente amplia para llevar a cabo el estudio. Las tomas de datos finalizaron cuando la demanda ciclista fue nula o mínima debido a que se acercaba el medio día, y según se comprobó a partir de observaciones previas realizadas en carretera, los ciclistas suelen realizar recorridos de mañana o de tarde, regresando a mediodía a sus viviendas.

4.2.2.3 Desarrollo de las tomas de datos

Para la realización de estas tomas de datos se requirió el desplazamiento de dos miembros del equipo de investigación al tramo de carretera. Cada investigador se colocó en un punto de control situados en la entrada y en la salida del tramo de estudio. En cada punto de control se instalaron los trípodes y soportes necesarios para asegurar que las cámaras estuviesen correctamente colocadas.

Los puntos de grabación donde se colocaron las cámaras fueron previamente seleccionados mediante visualizaciones de los puntos utilizando Google Earth, y verificados in situ. Se realizó la colocación del material de grabación de manera que se asegurase una correcta toma de datos naturalística, en la que los usuarios de la vía no adviertan de las grabaciones y por tanto circulen de manera normal, sin verse afectados por la presencia del equipo de grabación.

Se verificó la sincronización de las cámaras activando el dispositivo GPS que llevan incorporado y se inició el periodo de grabación, durante el cual los investigadores permanecieron en lugares desde los que no fueran percibidos por los usuarios de la vía. Durante el periodo de grabación se verificó periódicamente el correcto funcionamiento de las cámaras y se efectuaron los cambios de baterías necesarios.

Las grabaciones se complementaron con la realización de aforos manuales de apoyo, que permitieron resolver algunos problemas puntuales surgidos en el visionado de los vídeos en los que no se apreciaba bien el número de ciclistas debido al solape de estos entre ellos o con algún vehículo motorizado.

4.2.3 Reducción de datos

La reducción y tratamiento de los datos recogidos a partir de las grabaciones simultáneas realizadas en los extremos del tramo de estudio se realizó mediante el visionado de los vídeos y las anotaciones correspondientes en una hoja de cálculo de Excel.

Los vídeos se visionaron mediante el programa de preprocesamiento de vídeos Kinovea. Este programa permite ampliar la imagen, medir distancias y representar líneas de referencia o marcadores sobre la imagen. Kinovea ofrece una precisión del tiempo en centésimas de segundo, lo que permite registrar los tiempos de paso de cada usuario en la entrada y salida del tramo de carretera con la suficiente precisión. La Figura 39 muestra una imagen obtenida del software durante el proceso del visionado de un vídeo.

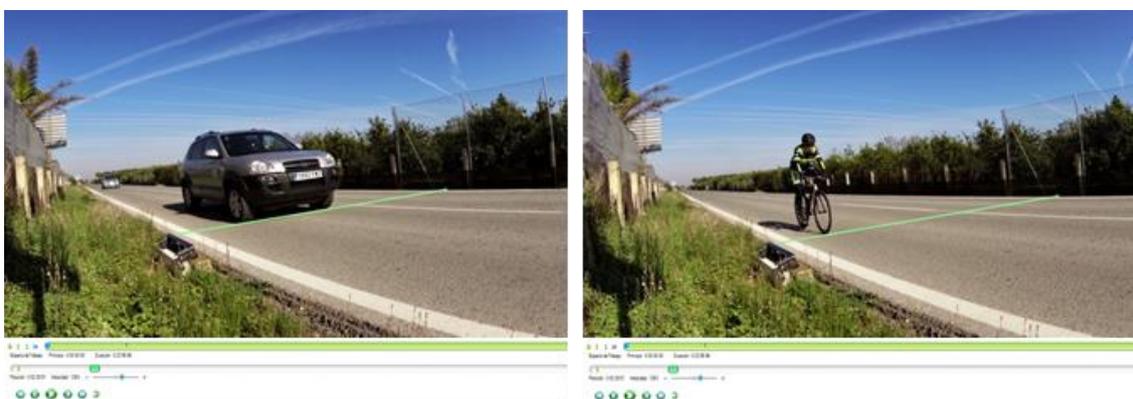


Figura 39. Visionado de un vídeo correspondiente a la salida del tramo de carretera mediante el programa Kinovea.

El proceso de reducción de datos se inició con el visionado de las grabaciones realizadas en la entrada del tramo. En este punto se registró cada usuario que entraba en el tramo indicando:

- Tipología: vehículo ligero, vehículo pesado, motocicleta, vehículo lento, bicicleta, pelotón u otro.
- Tiempo de paso.

En el registro de pelotones de ciclistas se anotó el número de ciclistas que formaban el grupo y su configuración en línea o en paralelo. En este punto de entrada al tramo se identificó a cada usuario con un ID, y se realizó una descripción de los vehículos, así como de los ciclistas, con la finalidad de registrar el mismo usuario a la salida.

Seguidamente se procesaron los vídeos en la salida del tramo, identificando a cada usuario según la descripción realizada en el punto de entrada al tramo, y se completó la información anotando el tiempo de salida de cada uno de ellos. Para los grupos de ciclistas se comprobó que el pelotón estaba formado por el mismo número de ciclistas y se anotó la configuración en la que circulaba el grupo en este punto. Se anotaron las posibles agrupaciones de ciclistas durante el recorrido.

Mediante este proceso de reducción de datos se obtuvo para cada usuario su tiempo de entrada y salida del tramo de carretera. a partir de estos datos se calcularon otras variables utilizadas en este estudio:

- Velocidad media de recorrido del tramo de cada usuario.
- Adelantamientos realizados por cada usuario durante su recorrido del tramo.
- Intervalos de tiempo entre usuarios en cada extremo del tramo.
- Porcentajes de vehículos en cola en cada extremo del tramo. El cálculo del porcentaje de vehículos en cola se realizó considerando que un vehículo circula en cola si el intervalo con su predecesor es menor de 3 s, siguiendo el criterio recomendado por el HCM 2016 (Transportation Research Board, 2016), y considerando a los vehículos que circulaban en cola de las bicicletas.

A partir de los tiempos de entrada y salida del tramo de estudio de cada usuario se calculan las intensidades de tráfico cada 15 minutos, tal y como recomienda el HCM 2016 (Transportation Research Board, 2016). Estas intensidades se calculan con ventanas deslizantes de 5 minutos, obteniendo diferentes escenarios de intensidades de ciclistas y de vehículos motorizados cada 15 minutos. Para las bicicletas se tiene en cuenta su agrupamiento, registrando el número de ciclistas que forman el grupo y su configuración en línea o en paralelo. A partir de estas intensidades de 15 minutos se calculan las intensidades equivalentes horarias para cada tipo de usuario, multiplicándolas por cuatro. Este proceso se realiza para los dos sentidos de circulación, y para el tráfico ciclista y motorizado por separado.

Los resultados finales, obtenidos mediante la metodología de tomas de datos simultáneamente en los extremos de los tramos de estudio a nivel macroscópico, son las intensidades horarias equivalentes de vehículos motorizados ligeros y de bicicletas, y las velocidades medias de recorrido de cada uno de estos usuarios. Estas intensidades horarias equivalentes, además de permitir analizar el comportamiento de la demanda de tráfico en cuanto a su variabilidad, también proporcionan los escenarios de tráfico necesarios para calibrar y validar el modelo de microsimulación de tráfico desarrollado en el siguiente apartado.

4.2.4 Modelo de microsimulación del tráfico

La finalidad de este estudio es analizar cómo afecta la presencia de ciclistas a la funcionalidad del tráfico en las carreteras convencionales. Para ello se han realizado varias observaciones en campo. Sin embargo, los escenarios de tráfico observados no cubren todo el rango de escenarios posibles, y algunas medidas de desempeño utilizadas para caracterizar la funcionalidad del tráfico son difícilmente medibles en campo.

Para aumentar el alcance del estudio se utilizará la microsimulación del tráfico, ya que esta herramienta permite por una parte simular diferentes escenarios variando la demanda de vehículos, tanto motorizados como bicicletas, así como las características geométricas de la vía, y, por otra parte, aumentar el número de medidas de desempeño obtenidas, permitiendo obtener algunas medidas de desempeño las cuales es realmente complicado conseguir a partir de observaciones en campo.

Para poder simular diferentes escenarios y obtener resultados válidos es esencial trabajar con un modelo de microsimulación correctamente adaptado a la circulación de ciclistas y a su interacción con los vehículos motorizados, que permita representar el comportamiento de los usuarios en carreteras convencionales. También es importante que el modelo esté debidamente calibrado y validado a partir de datos reales obtenidos en las observaciones realizadas en campo.

A partir del uso del modelo de microsimulación se obtendrán los efectos de la presencia de ciclistas en la funcionalidad de las carreteras, medidos como afecciones a las diferentes medidas de desempeño consideradas.

Para el desarrollo de la tesis se utiliza el software Aimsun Next. Al inicio de la tesis se trabajó con la versión Aimsun Next 8.4, y durante el desarrollo de la investigación se incorporaron algunas mejoras a la versión inicial, resultando al final de esta tesis en la versión Aimsun Next 20, disponible desde junio de 2020.

Esta versión incorpora una mejora que permite adelantar a vehículos más lentos incluso con línea continua (Aimsun, 2021), esta novedad permite representar la realidad más fielmente, ya que la normativa española permite adelantar a bicicletas incluso en línea continua si existe suficiente visibilidad según el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003).

Aimsun Next dispone de un módulo de adelantamiento en carreteras convencionales desarrollado por Llorca et al. (2015). En la presente tesis se adapta el modelo existente a la circulación de bicicletas y motorizados y a su interacción, y se calibra y valida con datos observados.

Actualmente en Aimsun Next 20 es incompatible el modelo bidireccional con el bidimensional, por tanto, al simular carreteras convencionales donde los vehículos interactúan con los que circulan en sentido opuesto no es posible simular los desplazamientos laterales dentro del carril, correspondientes a invasiones parciales del carril opuesto durante el adelantamiento. Desde el punto de vista de la seguridad, la invasión parcial es igual de peligrosa que la total, ya que implica un riesgo de colisión frontal con los opuestos, sin embargo, las invasiones parciales pueden suponer una reducción de la duración del adelantamiento, implicando un menor tiempo en el carril opuesto. En los adelantamientos a bicicletas la invasión parcial del carril opuesto durante el adelantamiento es frecuente. Por tanto, el modelo actual de microsimulación del tráfico en carreteras convencionales presenta una serie de limitaciones a la hora de incorporar a ciclistas que deben de ser superadas.

4.2.4.1 Adaptación del modelo de microsimulación del tráfico en Aimsun Next

El modelo de microsimulación de tráfico desarrollado en Aimsun Next 20 permite simular adelantamientos en carreteras convencionales teniendo en cuenta solamente a los vehículos motorizados. Sin embargo, para analizar el efecto sobre la funcionalidad del tráfico que supone la circulación de ciclistas es necesario integrar a los ciclistas como nuevos usuarios de la vía, así como las particularidades en cuanto a su interacción con los vehículos motorizados. Además, es necesario que el modelo simule correctamente la circulación de los propios vehículos motorizados y las interacciones que se dan entre ellos. Por tanto, la adaptación del modelo a la circulación de ciclistas y a su interacción con los motorizados se debe de realizar sin afectar el comportamiento de los vehículos motorizados, permitiendo que los adelantamientos entre motorizados se realicen correctamente.

Las limitaciones que presentaba inicialmente el software Aimsun respecto a la simulación de ciclistas en carreteras convencionales fueron discutidas con el equipo de Aimsun Next durante el desarrollo de la tesis. Finalmente, considerando las mejoras necesarias y adaptándolas a las posibilidades del microsimulador, se adoptaron una serie de modificaciones que permitieron adaptar el modelo existente sin restar eficacia a la simulación de los propios vehículos motorizados.

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. 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. En la Figura 40 se observa el parámetro introducido en la sección de estudio de un tramo de carretera convencional en Aimsun Next 20. Este parámetro permite adelantar incluso en línea continua a un usuario si la diferencia de velocidad máxima deseada entre el usuario adelantante y el predecesor es mayor o igual al valor proporcionado por el parámetro.

Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos y Dos Carriles

Sección Espejo:	281: Bet-Naq
Distancia de Visibilidad:	250.00 m
Factor de Visibilidad:	1.75
Diferencia de Velocidad para Adelantar con Línea Continua:	20.00 km/h

Figura 40. Parámetro de Aimsun Next 20 que 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 agrupaban 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 la tesis. 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. Esto tiene un efecto sobre la duración del adelantamiento, ya que es necesario realizar dos cambios de carril, uno para adelantar y otro para regresar al carril propio. 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. En la Figura 41 se observan los parámetros introducidos en Aimsun Next para el grupo de 4 ciclistas en uno de los tramos de carretera analizados, se observa la longitud equivalente calibrada y el ancho menor a la mitad del carril para activar la posibilidad de adelantar con sólo dos pasos de simulación.

 Tipo de Vehículo: 377, Nombre: 4P {97c8307d-777c-4c7f-a8fe-58b7cf7e9316}

	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Longitud	6.00 m	0.00 m	6.00 m	6.00 m
Anchura	1.20 m	0.00 m	1.20 m	1.20 m
Velocidad Máxima Deseada	34.00 km/h	1.00 km/h	33.00 km/h	35.00 km/h

Figura 41. Parámetros relativos a un usuario en Aimsun Next.

Una vez identificadas las limitaciones que presenta el microsimulador de tráfico Aimsun Next y planteadas las mejoras que permiten superar estas limitaciones se procede a crear el modelo en el microsimulador. Para cada tramo de carretera se crea un modelo, ya que cada carretera presenta unas características geométricas y de tráfico particulares. En cada modelo generado se especifican el modelo físico del tramo de carretera y los usuarios, introduciendo las características observadas de cada uno de ellos.

El primer paso consiste en crear el modelo físico del tramo de estudio. Para ello se crea la sección con la longitud y las características de velocidades límite, capacidad, pendientes y zonas de adelantamiento permitidas observadas en la realidad.

Una vez se han introducido las características base, se crea la sección espejo, que corresponde con el carril de sentido opuesto, en la que se introducen las velocidades límite y las líneas continuas correspondientes, estas dos secciones se unen para obtener una carretera convencional, donde interactúen los dos sentidos de circulación y se permita el adelantamiento

entre los usuarios. En los parámetros relativos a cada sentido de circulación se introducen las características físicas descritas anteriormente, y el parámetro del umbral de diferencia de velocidad deseada para permitir el adelantamiento incluso en línea continua. Para cada sección también se indica la sección espejo correspondiente y los parámetros de visibilidad que condicionan el adelantamiento entre motorizados calibrados por Llorca et al. (2015), estos parámetros se muestran en la Figura 40.

Para tener en cuenta el porcentaje de vehículos en cola a la entrada del tramo se crean dos secciones de un solo carril anteriores a las entradas del tramo en los dos sentidos, las longitudes de estas secciones se calibrarán para asegurar un porcentaje de vehículos en cola a la entrada del tramo similar al observado en la realidad (Figura 42).

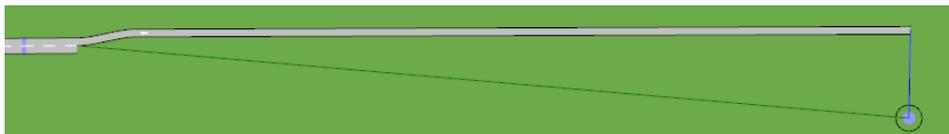


Figura 42. Tramo de generación de cola anterior a la entrada del tramo de estudio.

Seguidamente se crean los usuarios según las observaciones realizadas en los tramos de estudio. Se crean 8 tipos de vehículos, 7 de ellos representan a las configuraciones de grupos de ciclistas que se consideraron en la toma de datos a nivel microscópico con bicicletas instrumentadas, el último tipo de vehículo representa a los vehículos motorizados ligeros. Los grupos de ciclistas se consideran un solo usuario, ya que generalmente circulan todos juntos y a la misma velocidad, y se les asigna una longitud equivalente según los ciclistas que los formen, en la Figura 43 se puede observar el adelantamiento a un grupo de ciclistas. Esta longitud se calibrará con los datos de las duraciones de los adelantamientos observadas en la realidad. Para cada usuario se introduce su longitud equivalente y su velocidad máxima deseada basada en las observaciones realizadas en cada tramo de carretera.

En el modelo se considera un periodo de calentamiento previo a la simulación, este calentamiento tiene una duración de una hora y se realiza solamente con vehículos ligeros, y permite que al empezar la simulación el modelo no esté vacío, sino en un estado de tráfico similar al observado para cada escenario.

Seguidamente se definen las matrices origen-destino donde se introducen el número de usuarios que se deseen simular en cada escenario. Se introduce un detector a la entrada y otro a la salida del tramo en el sentido en el que se va a analizar el efecto de la circulación de ciclistas. Estos detectores permiten obtener datos de tiempos de paso y velocidades puntuales de los usuarios a su paso por el detector.

Con el modelo físico creado y los usuarios definidos se pueden empezar las simulaciones de los diferentes escenarios de tráfico observados con el fin de calibrar los parámetros y obtener un modelo que represente la realidad de manera fiable. Para cada escenario simulado se realizan 15 replicaciones, y se toman como resultados los valores promedio. Se ha comprobado que 15 replicaciones son suficientes para asegurar valores correctos de los resultados teniendo en cuenta la variabilidad ligada a la aleatoriedad de las replicaciones. Los resultados de las simulaciones se obtienen directamente del simulador, o bien desde varias interfaces de programación de aplicaciones (APIs) proporcionadas desde el equipo de Aimsun Next que permiten obtener datos de trayectorias de los usuarios.

Una vez creado el modelo físico, se calibra y valida simulando los escenarios de tráfico observados en cada tramo de carretera.

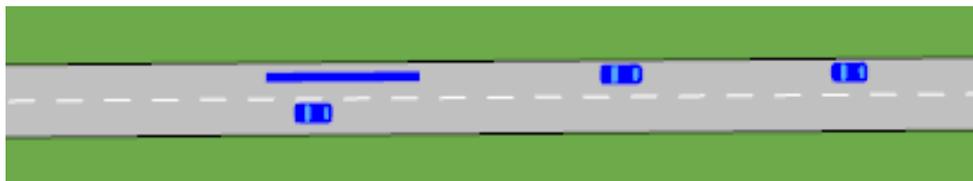


Figura 43. Adelantamiento a un grupo de ciclistas en el software Aimsun Next 20.

4.2.4.2 Calibración y validación del modelo de microsimulación del tráfico

Un modelo de microsimulación se puede considerar válido y puede ser utilizado de manera fiable si presenta unos procesos de calibración y validación aceptables. La calibración y la validación del modelo se realizan comparando los resultados del modelo con los datos reales observados en campo, y obteniendo los valores de los parámetros que minimizan las diferencias entre los valores observados en la realidad y los resultados de las simulaciones.

Existen dos niveles de calibración del modelo:

- Nivel microscópico: se modeliza el comportamiento de cada vehículo en cada adelantamiento, se calibran los parámetros del comportamiento microscópico de los vehículos hasta conseguir que su comportamiento sea similar al real. En Aimsun Next el comportamiento de cada vehículo se basa en varios modelos que determinan su circulación e interacción con los otros: car following model, lane changing y gap acceptance. Estos modelos se basan en parámetros que pueden ser adaptados a cada escenario de simulación para poder calibrar el modelo y que represente la realidad de una manera más exacta.
- Nivel macroscópico: una vez modelado y calibrado el comportamiento microscópico de los usuarios se calibra el modelo con datos de comportamiento macroscópico de todo el tramo, tales como ATS o número de adelantamientos realizados en el tramo.

Los escenarios de tráfico para calibrar y validar el modelo se obtienen de las tomas de datos a nivel macroscópico del tramo. En cada escenario se dispone de datos de velocidades medias de recorrido de cada usuario y de intervalos de tiempo entre usuarios en la entrada y en la salida del tramo. Para calibrar el modelo se utilizan los escenarios con mayor y menor demanda ciclista y otro escenario con una demanda media, y una vez calibrado el modelo se valida con cuatro escenarios con demandas diferentes a los utilizados en la calibración.

El modelo se calibra primero a nivel microscópico, obteniendo datos de duraciones del adelantamiento a cada grupo de ciclistas, calibrando la longitud equivalente de cada grupo de bicicletas para conseguir las duraciones del adelantamiento observadas. Después se calibra a nivel macroscópico o de sección, obteniendo los valores de los parámetros que minimicen las diferencias entre las observaciones y los resultados de las simulaciones de velocidades medias de recorrido, intervalos de tiempo entre los usuarios y porcentajes de vehículos en cola.

Este proceso de calibración es iterativo, se varían los parámetros y se comprueban los resultados. Existen diversos parámetros en el programa que regulan el comportamiento de los vehículos y su interacción con otros vehículos. Estos parámetros pueden ser calibrados para que representen de una manera más exacta la realidad. En el caso de los adelantamientos a bicicletas estos parámetros tomarán valores distintos a los relativos a adelantamientos entre vehículos motorizados, el problema es que, en las carreteras convencionales, y en el simulador también,

se combinan adelantamientos a bicicletas y entre vehículos motorizados al mismo tiempo, por tanto, los parámetros a calibrar deben de ser válidos para todos los vehículos que participan en el modelo.

Los parámetros del modelo que se calibran se dividen en tres tipos, los relativos a la geometría del tramo, los relativos a las características de los usuarios y los relativos al funcionamiento del modelo (Tabla 11). El resto de parámetros del modelo de adelantamiento se han variado mínimamente, para asegurar que los vehículos ligeros se adelanten entre sí correctamente.

Tipo de parámetro	Parámetro
Geometría del tramo	Diferencia de velocidades para adelantar en línea continua (km/h)
	Longitud de tramos de generación de colas (m)
Características de los usuarios	Longitud equivalente de cada grupo de ciclistas (m)
	Distribución de velocidad máxima deseada de cada tipo de usuario (km/h)
Funcionamiento del modelo	Demora entre adelantamientos simultáneos (s)
	Número de adelantamientos simultáneos permitidos
	Rango máximo en la cola para desear adelantar
	Umbral de tiempo hasta fin de tramo (s)

Tabla 11. Parámetros del modelo de microsimulación a calibrar en Aimsun Next 20.

Las diferencias entre los valores observados de las variables y los valores obtenidos de las simulaciones se calculan mediante métodos estadísticos. Las distribuciones de datos observados y simulados se comparan utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov para las duraciones de los adelantamientos, las velocidades medias de recorrido y los intervalos de tiempo entre usuarios. En esta prueba no paramétrica la hipótesis nula implica que las dos muestras provienen de la misma distribución, y la máxima distancia entre las distribuciones de las dos muestras se compara con una distancia admisible. Las medias, desviaciones y medianas de las variables observadas y simuladas se comparan mediante pruebas t, F y U respectivamente. Las hipótesis nulas de estas pruebas implican que las medias, desviaciones y medianas son iguales. La prueba ANOVA se utiliza para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre dos muestras de datos que cumplan los supuestos requeridos para aplicar esta prueba. Para comparar valores de variables observadas y simuladas se utiliza el error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (V_{obs,i} - V_{sim,i})^2}{N}} \quad (10)$$

donde:

$V_{obs,i}$ es el valor de la variable simulada en el escenario i

$V_{sim,i}$ es el valor de la variable observada en el escenario i

N es el número de escenarios de calibración o validación

El proceso de validación se realizó a nivel macroscópico, utilizando las pruebas estadísticas explicadas anteriormente para comparar los datos simulados con los observados en cuatro escenarios diferentes a los utilizados para calibrar el modelo.

Debido a las diferencias en cuanto a las características geométricas y de tráfico de cada tramo de estudio, y del comportamiento de los usuarios en cada uno de ellos, cada tramo de carretera debe de calibrarse y validarse con los datos observados particularmente en este. De esta manera se asegura que el modelo realiza simulaciones correctas para cada tramo en particular.

4.2.5 Análisis de la funcionalidad del tráfico

Para analizar cómo afecta el tráfico ciclista a la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales es necesario definir las medidas de desempeño necesarias para caracterizar esta afección. Las medidas de desempeño se calcularon a partir de los datos observados y también a partir de los datos obtenidos mediante el microsimulador de tráfico. Estas medidas de desempeño deben de representar el efecto del tráfico ciclista, por tanto, deben de ser sensibles a variaciones en la demanda ciclista. En este apartado se describen las principales medidas de desempeño utilizadas en esta tesis para caracterizar la funcionalidad del tráfico en carreteras con presencia de ciclistas.

Por otra parte, el uso del microsimulador de tráfico permitió simular escenarios de tráfico diseñados teniendo en cuenta variaciones en la demanda tanto de ciclistas como de vehículos motorizados, para así evaluar la afección sobre la funcionalidad del tráfico al variar estas demandas. En este apartado se detalla la metodología utilizada en el diseño de los escenarios de tráfico simulados para caracterizar la funcionalidad del tráfico.

4.2.5.1 Medidas de desempeño

Se calcularon y analizaron diferentes medidas de desempeño, para conocer la sensibilidad de cada una a las variaciones del tráfico tanto ciclista como motorizado. En este apartado se describen las medidas de desempeño utilizadas en esta tesis para caracterizar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas.

Luttinen (2001) definió unos criterios que deben de cumplir las medidas de desempeño ideales utilizadas para el análisis de la operación del tráfico y la capacidad en carreteras convencionales:

1. Deben de reflejar la percepción de los usuarios de la vía respecto a la calidad del tráfico.
2. Deben de ser fácilmente medibles y estimables a partir de datos observados en campo.
3. Deben correlacionarse con el tráfico y las condiciones de la carretera de una manera significativa.
4. Deben de ser compatibles con medidas de desempeño utilizadas en otros tipos de infraestructuras.
5. Deben de ser capaces de describir tanto las condiciones de no congestión como de congestión.
6. Deben de ser útiles en el análisis relativo a seguridad vial, economía del transporte e impactos ambientales.

Por tanto, las medidas de desempeño utilizadas deben de cumplir una serie de requisitos para asegurar la correcta caracterización de la funcionalidad del tráfico. Particularmente para este estudio deben de presentar una sensibilidad al tráfico ciclista, representando correctamente el efecto que el tráfico ciclista supone sobre la funcionalidad del tráfico.

En esta tesis se han analizado las medidas de desempeño propuestas por el HCM 2016 (Transportation Research Board, 2016): Velocidad media de recorrido y Porcentaje de tiempo en seguimiento.

También se ha analizado la nueva medida de desempeño propuesta en el Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance (Transportation Research Board, 2018): Densidad de seguidores.

Además de estas medidas de desempeño, se han analizado otras normalmente contempladas en estudios de análisis de la funcionalidad del tráfico y de la capacidad en carreteras convencionales: tiempo de demora y número de adelantamientos por vehículo.

Sin embargo, todas estas medidas de desempeño han sido conceptualizadas para medir el efecto en el funcionamiento del tráfico generado por vehículos motorizados, sin considerar la existencia de tráfico ciclista, y pueden no caracterizar correctamente el fenómeno real.

A continuación, se enumeran las medidas de desempeño analizadas en esta tesis para caracterizar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas. Algunas de estas medidas se han obtenido a partir de datos de campo, pero el análisis más profundo se ha realizado con los datos obtenidos del microsimulador de tráfico. Estas medidas se han obtenido a nivel de segmento de carretera, a partir de un análisis direccional, y teniendo en cuenta a los vehículos que han completado el recorrido del tramo.

Velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros

Esta medida de desempeño es una de las utilizadas en el HCM (Transportation Research Board, 2016), y se define como la longitud del tramo de carretera entre el tiempo de recorrido del tramo. Es fácilmente medible en campo a partir de los tiempo de entrada y salida del tramo de carretera de cada usuario. En Aimsun Next se calcula como la velocidad media de todos los vehículos que han atravesado el tramo.

Porcentaje de tiempo en seguimiento

Es el porcentaje promedio de tiempo que los vehículos deben viajar en pelotones detrás de los vehículos más lentos debido a la imposibilidad de adelantar. Representa la libertad de maniobra y la comodidad y conveniencia de viajar. Es difícil de calcular en campo, se calcula a partir de ecuaciones del HCM 2016, que no consideran el tráfico ciclista. Por tanto, es una mala medida de desempeño para representar el efecto del tráfico ciclista. De hecho, el estudio publicado por Transportation Research Board (2018) rechaza el uso del porcentaje de tiempo en seguimiento en su metodología. Esta medida de desempeño se calculará para analizar si representa adecuadamente la afección sobre la funcionalidad generada por el tráfico ciclista.

Tiempo de demora

Es el tiempo medio de demora por vehículo. Corresponde con la diferencia entre el tiempo de viaje esperado (tiempo que tardaría en atravesar la sección en condiciones ideales) y el tiempo de viaje. Se calcula como el promedio de todos los vehículos. Esta medida de desempeño es difícil de medir en campo, sin embargo, en el microsimulador de tráfico se obtiene fácilmente.

Porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo

Es el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de viaje medido durante el período de simulación. Se obtiene a partir del microsimulador, y al ser un porcentaje permite la comparación de los resultados entre diferentes escenarios, tanto de tráfico como geométricos.

Número de adelantamientos realizados por vehículo

Se obtiene a partir de la metodología de toma de datos en los extremos del tramo, considerando tiempos de entrada y salida de cada usuario. En el microsimulador se calcula como la mitad del número de cambios de carril por vehículo, ya que por cada adelantamiento realizado se registran dos cambios de carril.

Porcentaje de vehículos en cola

Es el porcentaje de usuarios que circulan por el mismo carril con intervalos de tiempo entre ellos menores que un cierto umbral respecto a todos los usuarios. Se trata de una medida puntual, es el porcentaje de vehículos que pasan por un punto determinado de la calzada que se considera que están en un estado de seguimiento. Se calcula a partir de datos observados en los extremos del tramo de carretera, y a partir del microsimulador de tráfico utilizando los datos registrados por los detectores situados en cada carril. Debido a su facilidad de cálculo en campo se usa como medida subrogada del porcentaje de tiempo en seguimiento. El HCM 2016 (Transportation Research Board, 2016) recomienda calcular el porcentaje de vehículos en cola considerando un umbral de 3 s, mientras que el estudio realizado por el Transportation Research Board (2018) considera un umbral de 2.5 s, basándose en valores observados más adaptados al tráfico actual.

Densidad de seguidores

Se define como el número de seguidores por kilómetro por carril. Se trata de una medida puntual, generalmente se calcula en la salida del tramo de carretera, y se define como el producto del porcentaje de vehículos en cola por la densidad. Se considera la mejor medida de desempeño para caracterizar la funcionalidad y el nivel de servicio de un tramo de carretera convencional (Transportation Research Board, 2018). El cálculo de la densidad de seguidores se realiza según la ecuación 4 del capítulo de materiales y métodos.

Durante el desarrollo de la tesis se calcularán estas medidas de desempeño a partir de datos observados y mediante el uso del modelo de microsimulación del tráfico. De esta manera se analizará la variación de estas medidas para diferentes escenarios de tráfico ciclista, obteniendo en qué medida el tráfico ciclista afecta a la funcionalidad del tráfico en estas vías.

4.2.5.2 Diseño de escenarios de tráfico

Con el fin de analizar la funcionalidad del tráfico considerando diferentes escenarios de tráfico, tanto motorizado como ciclista, se utiliza el microsimulador de tráfico. Esta herramienta permite simular escenarios no observados, a partir de un modelo debidamente calibrado y validado con datos reales.

Para poder simular escenarios teniendo en cuenta variaciones proporcionales de la demanda ciclista y motorizada es necesario realizar un proceso de diseño de escenarios de tráfico. Estos escenarios tienen que representar las variaciones de volumen de los dos usuarios implicados en el fenómeno y, en el caso de los ciclistas, las diferentes configuraciones, en línea o en paralelo, y la posible distribución en grupos grandes o pequeños.

Para realizar este diseño de escenarios de tráfico se parte del escenario de máxima demanda ciclista observada en cada tramo de estudio, con su correspondiente tráfico motorizado.

Para diseñar los escenarios de tráfico ciclista se consideró el escenario con el máximo volumen horario de ciclistas observado. Este volumen máximo de bicicletas registrado se ha variado en términos porcentuales, de 0% a 500%, con saltos del 50%, correspondiendo el 100% con la demanda ciclista máxima observada. Así, el número de escenarios de demanda ciclista fue de once. La distribución en grupos de ciclistas se ha mantenido proporcional al escenario de volumen máximo de ciclismo observado. Este diseño de escenarios se ha realizado considerando a todos los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo independientemente, para así

observar el efecto de la configuración de los grupos de ciclistas. Los valores se han redondeado para ingresar números de ciclistas a simular correctamente en el microsimulador.

El volumen de tráfico motorizado tiene un papel importante en este fenómeno. En cuanto a la variación del tráfico motorizado, se basó en la información de los cómputos oficiales de tráfico (Diputació de València, 2019; Generalitat Valenciana, 2020b) y en las observaciones realizadas en campo. Se analizaron tres volúmenes de tráfico motorizado:

- El primero corresponde con el volumen de tráfico observado durante la recolección de datos relativo al escenario de máxima demanda ciclista observada (M1).
- El segundo corresponde con la información proporcionada por los organismos oficiales en cuanto a la intensidad media diaria de vehículos en cada tramo de estudio (M2).
- El último volumen de tráfico motorizado analizado corresponde a un tráfico máximo hipotético, siendo aproximadamente el doble que el considerado en M2 (M3).

Para cada tramo de estudio se simularon los once escenarios de demanda ciclista para cada uno de los tres escenarios de demanda motorizada y para cada una de las dos configuraciones de los grupos de ciclistas, generándose un total de 66 escenarios de tráfico para cada tramo de estudio. En la simulación de cada uno de estos escenarios se calcularon todas las medidas de desempeño descritas anteriormente, siendo posible analizar el efecto de las variaciones de las demandas ciclistas y motorizadas sobre cada una de las medidas de desempeño calculadas.

Capítulo 5

Análisis de resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en las diferentes partes de la investigación.

En primer lugar, se presentan los resultados obtenidos en las tomas de datos con las bicicletas instrumentadas, que han permitido caracterizar la maniobra de adelantamiento a ciclistas circulando individualmente y en grupo. Estos resultados también han servido de base para modelizar la duración del adelantamiento, en la que se han utilizado métodos Bayesianos para desarrollar un modelo predictivo que permite obtener datos de duraciones teniendo en cuenta factores relativos a los ciclistas, a la carretera y a la propia maniobra de adelantamiento.

Seguidamente se presentan los resultados del análisis de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas. El análisis de los resultados se ha basado en las tomas de datos mediante observaciones en los extremos de los tramos de estudio. En este apartado se presentan también los resultados del proceso de adaptación de un modelo de microsimulación del tráfico que integra a los ciclistas, y a su interacción con los vehículos motorizados, en carreteras convencionales. Este modelo ha sido calibrado y validado con datos observados en dos tramos de carretera.

A continuación, se muestran los resultados derivados del uso del modelo de microsimulación del tráfico. Estos resultados permiten caracterizar la funcionalidad del tráfico analizando diferentes medidas de desempeño obtenidas a partir de las simulaciones de una serie de escenarios de tráfico diseñados en base a las observaciones realizadas en los tramos de estudio.

Finalmente, se presentan los resultados de diversas aplicaciones del modelo de microsimulación que permiten analizar el efecto de algunas medidas de gestión del tráfico en la carretera.

5.1 Análisis de la maniobra de adelantamiento a ciclistas

Para el estudio de la maniobra de adelantamiento se ha utilizado la metodología de toma de datos mediante bicicletas instrumentadas (ver apartado 4.7.1). Los datos recogidos han permitido caracterizar cuantitativamente las variables descriptivas relativas a la maniobra de adelantamiento entre vehículos motorizados y ciclistas. En primer lugar, se ha realizado un análisis descriptivo de las variables recogidas en campo. A continuación, se analiza con más profundidad la duración del adelantamiento, ya que es una variable clave desde el punto de vista de la operación del tráfico, desarrollando modelos Bayesianos que permiten analizar la influencia de diferentes factores en la duración del adelantamiento y obtener predicciones de duraciones en condiciones diferentes a las observadas.

5.1.1 Caracterización de la maniobra de adelantamiento

Mediante el recorrido de los tramos de estudio con las bicicletas instrumentadas se han recogido datos relativos a las interacciones entre ciclistas y conductores, especialmente durante las maniobras de adelantamiento. Los datos específicos de las maniobras de adelantamiento y seguimiento son necesarios para estudiar en detalle el comportamiento, tanto de ciclistas como de conductores, para tener una mejor comprensión del fenómeno, permitiendo así realizar recomendaciones y mejoras basadas en datos observados.

En el estudio se han considerado diferentes configuraciones de los grupos de ciclistas que realizan los recorridos con las bicicletas instrumentadas, variando el número de ciclistas y su configuración en línea y en paralelo.

El estudio se ha llevado a cabo en diferentes tramos de carreteras convencionales, considerando diferentes características geométricas y de tráfico. Los resultados obtenidos han permitido caracterizar las maniobras de adelantamiento de vehículos motorizados a bicicletas, analizando el efecto de varios factores relativos a la carretera, al número de ciclistas que forman el grupo y su configuración, así como factores relativos a la propia maniobra de adelantamiento.

Después del tratamiento de todos los datos obtenidos mediante las cámaras y los velocímetros, se ha obtenido una base de datos final donde se han incorporado las bases de datos individuales de cada tramo. Esta base de datos final ha sido tratada para eliminar datos anómalos, donde los ciclistas no respetaron las configuraciones del grupo indicadas, o donde los dispositivos de registro de datos no funcionaron adecuadamente. En el descarte de datos anómalos también se tuvieron en cuenta los adelantamientos que no corresponden con las condiciones de este estudio, como adelantamientos registrados en intersecciones o en subtramos donde existe más de un carril por sentido, zonas cebreadas que ensanchan la calzada o travesías. También se descartaron las interacciones registradas en los tramos anteriores y posteriores a estas zonas, donde tienen una influencia sobre el tráfico.

Finalmente, tras este proceso de reducción de datos anómalos, se ha obtenido un total de 2,346 adelantamientos registrados correctamente. En la Tabla 12 se muestra una descripción de las interacciones registradas.

Número total de interacciones registradas	9346
Datos anómalos descartados	1024
Interacciones válidas	8322
Interacciones con opuestos	5976
Adelantamientos	2346
Adelantamientos realizados por vehículos ligeros	2135

Tabla 12. Número de interacciones registradas en las tomas de datos con bicicletas instrumentadas.

En la Figura 44 se observa la distribución de estos adelantamientos por tramo de estudio y por configuración del grupo de ciclistas.

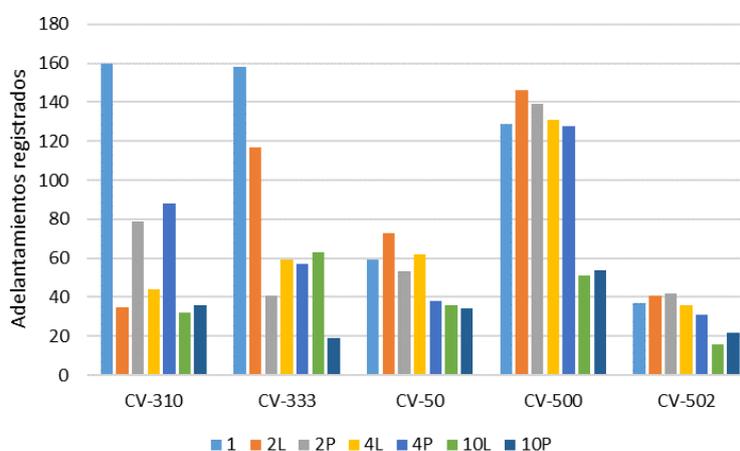


Figura 44. Adelantamientos registrados por tramo de estudio y configuración del grupo de ciclistas.

Se observa en la Figura 44 que el número de adelantamientos registrados en el tramo de la carretera CV-500 es más elevado debido a su mayor IMD, también se observa generalmente un mayor número de adelantamientos registrados para la configuración individual, debido a que resulta más fácil adelantar a un ciclista solo que a un grupo de ciclistas. En el tramo de la CV-502 se registró un número menor de adelantamientos debido a su menor IMD. Con el fin de obtener una suficiente muestra en todos los tramos de todas las configuraciones, en la segunda fase de toma de datos, se partió de los adelantamientos registrados en la primera fase, y se diseñaron las configuraciones y se seleccionaron los tramos de manera que se compensasen en cada tramo las configuraciones con menores maniobras de adelantamiento registradas.

A continuación, se realiza un análisis descriptivo de los adelantamientos registrados mediante las bicicletas instrumentadas en esta investigación. Se detallan los resultados teniendo en cuenta varios factores relativos a los vehículos implicados, tanto motorizados como ciclistas, así como a características geométricas y de tráfico de la carretera y de la propia maniobra de adelantamiento.

5.1.1.1 Tamaño muestral de adelantamientos registrados por carretera y configuración del grupo de ciclistas

Previo a la realización del estudio estadístico, se ha realizado el cálculo de la suficiencia del tamaño de la muestra, considerando para cada tramo de estudio la muestra registrada de adelantamientos a cada configuración del grupo de ciclistas.

Existen zonas en las que se ha registrado un número menor de adelantamientos, para verificar si el tamaño de la muestra de la que se dispone es suficiente se ha calculado el error obtenido considerando los datos de velocidad y separación lateral para cada tramo de estudio y configuración. Para calcular este error se ha considerado un nivel de confianza del 95%, y se ha asumido que las velocidades y las separaciones provienen de distribuciones normales. El error se ha calculado mediante la ecuación (11):

$$e = \sqrt{\frac{Z_{0.95}^2 * s^2}{n}} \quad (11)$$

donde:

- e es el error obtenido
- $Z_{0.95}$ es el estadístico t para un nivel de confianza del 95%, siendo igual a 1.96
- s es la desviación estándar de la muestra
- n es el tamaño de la muestra

Solamente se han tenido en cuenta los adelantamientos de los que se tienen datos de velocidad y separación lateral, ya que el error se ha calculado sobre la muestra de estas variables. Después de descartar los adelantamientos producidos por motocicletas y vehículos pesados y lentos, la muestra se ha reducido a 2,135 adelantamientos (Tabla 12). De estos adelantamientos se tienen datos de velocidades y separaciones laterales de 2,028. Se consideran los umbrales de error no aceptable para velocidades mayores de 6 km/h y para separaciones mayores de 0.2 metros.

La Tabla 13 muestra los valores del error obtenido a partir de los registros de velocidades del vehículo adelantante y separaciones laterales para cada tramo de estudio y cada configuración del grupo de ciclistas, así como el número de observaciones obtenidas.

CV-500														
	1		2P		2L		4P		4L		10L		10P	
	Vel	Sep												
Error	1.69	0.08	1.62	0.09	1.32	0.07	1.58	0.08	1.56	0.08	2.41	0.13	2.16	0.13
N	94	94	116	116	136	136	117	117	117	117	46	46	52	52
Media	52.71	1.63	52.97	1.59	52.38	1.77	54.82	1.66	59.48	1.74	63.54	1.78	62.23	1.72
Desv	8.38	0.40	8.91	0.47	7.85	0.40	8.74	0.44	8.59	0.43	8.34	0.45	7.96	0.47
CV-502														
	1		2P		2L		4P		4L		10L		10P	
	Vel	Sep												
Error	5.68	0.17	4.51	0.15	6.17	0.15	5.40	0.12	4.73	0.15	4.97	0.20	5.38	0.22
N	28	28	37	37	35	35	30	30	33	33	15	15	21	21
Media	66.14	1.89	63.41	1.63	65.37	1.78	63.10	1.66	68.82	1.93	62.60	1.97	63.95	1.85
Desv	15.33	0.45	13.99	0.45	18.63	0.47	15.08	0.33	13.86	0.43	9.81	0.39	12.58	0.51
CV-310														
	1		2P		2L		4P		4L		10L		10P	
	Vel	Sep												
Error	1.74	0.07	2.57	0.09	5.10	0.18	3.76	0.09	4.16	0.14	4.39	0.19	4.19	0.19
N	144	144	75	75	33	33	79	79	40	40	30	30	31	31
Media	70.22	1.81	62.44	1.72	72.27	1.84	67.34	1.68	70.13	1.93	72.40	1.86	55.90	1.77
Desv	10.63	0.42	11.34	0.41	14.95	0.53	17.06	0.42	13.41	0.44	12.26	0.53	11.90	0.55
CV-333														
	1		2P		2L		4P		4L		10L		10P	
	Vel	Sep												
Error	2.95	0.09	5.34	0.17	3.64	0.09	4.27	0.12	4.04	0.13	4.33	0.13	7.39	0.23
N	121	121	37	37	103	103	55	55	53	53	52	52	16	16
Media	65.96	1.95	65.41	1.82	70.12	1.92	66.07	1.97	64.06	1.90	73.06	1.91	63.69	2.14
Desv	16.53	0.49	16.57	0.52	18.85	0.48	16.16	0.47	15.02	0.47	15.92	0.46	15.09	0.46
CV-50														
	1		2P		2L		4P		4L		10L		10P	
	Vel	Sep												
Error	5.71	0.17	4.62	0.16	4.23	0.09	5.23	0.15	4.53	0.13	5.83	0.15	5.51	0.20
N	37	37	42	42	64	64	35	35	44	44	28	28	32	30
Media	82.59	2.07	74.10	1.70	88.03	2.16	79.06	2.01	73.25	2.06	70.79	2.12	69.88	1.81
Desv	17.73	0.54	15.26	0.53	17.27	0.39	15.78	0.45	15.32	0.44	15.73	0.40	15.89	0.57

Tabla 13. Error obtenido relativo a la velocidad del adelantante (km/h) y a la separación lateral (m) con el tamaño de la muestra para los diferentes tramos de estudio considerando cada configuración del grupo de ciclistas.

Según se observa en la Tabla 13 en la mayor parte de los datos los valores del error están por debajo de los umbrales establecidos. Asimismo, tan solo en un valor de velocidad y dos valores de separaciones los valores superan mínimamente a los umbrales marcados, pudiendo considerarse aceptable este error (los valores de error obtenidos no superan excesivamente los umbrales fijados). En los casos donde el error obtenido supera los umbrales máximos fijados se debería de ampliar el tamaño de la muestra tomando más datos. A la vista de los resultados, y dada la complejidad de organizar y llevar a cabo nuevas tomas de datos, se asumen los errores obtenidos como aceptables y, por tanto, la totalidad de la muestra es representativa.

5.1.1.2 Tipo de vehículo adelantante

La primera variable analizada ha sido el tipo de vehículo adelantante. En la reducción de los datos los vehículos fueron clasificados en tres tipologías principales: vehículos ligeros, motocicletas y vehículos pesados. El porcentaje de cada tipo de vehículo adelantante respecto del total de las maniobras de adelantamiento registradas correspondió en un 91% a vehículos motorizados ligeros, en un 5% a vehículos motorizados pesados, considerándose pesados vehículos con una longitud mayor de diez metros, y en el 4% restante a motocicletas.

Se analizaron los datos de velocidades durante el adelantamiento, separaciones laterales y duración de los adelantamientos para los tres tipos de vehículos adelantantes observados. En la Figura 45 se muestran las distribuciones de estas variables según el tipo de vehículo que realizó el adelantamiento a los ciclistas.

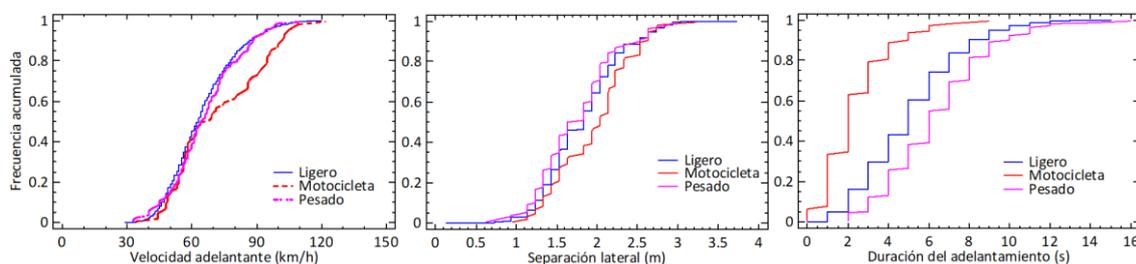


Figura 45. Distribuciones de la velocidad del adelantante (km/h), separación lateral (m) y duración del adelantamiento (s) según tipo de vehículo adelantante.

Se compararon las medias de las velocidades durante el adelantamiento entre los tres tipos de vehículos mediante una prueba ANOVA ($F=7.80$, $p\text{-valor}<0.05$), obteniéndose diferencias estadísticamente significativas entre los ligeros y las motocicletas, así como entre los pesados y las motocicletas con un nivel de confianza del 95%, siendo los valores medios de las velocidades del adelantamiento de las motocicletas mayores.

Los valores medios de las separaciones laterales también mostraron diferencias estadísticamente significativas entre las motocicletas y los otros dos tipos de vehículos con un nivel de significancia del 95%, presentando valores superiores en el caso de las motocicletas (ANOVA $F=5.39$, $p\text{-valor}<0.05$). En cuanto a las duraciones del adelantamiento, se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tres tipos de vehículos con un nivel de significancia del 5%, obteniendo valores más elevados para los pesados, y menores para las motocicletas (ANOVA $F=62.31$, $p\text{-valor}<0.05$).

Por tanto, los resultados de esta investigación se han centrado en el estudio de la maniobra de adelantamiento entre vehículos ligeros y bicicletas, ya que las motocicletas y los vehículos pesados, dadas sus características, presentaron un comportamiento diferente a la hora de adelantar a los ciclistas. Además, las muestras registradas para pesados y motocicletas fueron muy reducidas y no resultan estadísticamente significativas para realizar un posterior análisis.

5.1.1.3 Tipo de maniobra de adelantamiento

En la reducción de los datos, a partir de la línea temporal de cada adelantamiento, se registró el tipo de maniobra que realizaron los vehículos motorizados al adelantar a los ciclistas. Estas maniobras pueden ser lanzadas, cuando el vehículo adelantante realiza el adelantamiento sin seguimiento previo a los ciclistas, o en seguimiento, cuando el tiempo de inicio de la maniobra es posterior al tiempo de llegada a las bicicletas. También se han registrado maniobras denominadas en grupo o cola, cuando el vehículo adelantante circula en cola de otro vehículo que también ha realizado el adelantamiento previamente, y por tanto su comportamiento está influenciado por el vehículo precedente.

En la Figura 46 se muestran los resultados de los porcentajes de cada tipo de maniobra observados para cada tramo de estudio. Se observan mayores porcentajes de maniobras realizadas desde el seguimiento para las secciones más desfavorables con menor ancho del arcén, de hecho, el mayor porcentaje de seguimiento se registró en el tramo de la CV-502 donde el arcén es nulo, mientras que el segmento de la CV-50, con una sección más ancha registró el

mayor número de maniobras lanzadas. La CV-500 registró el mayor porcentaje de vehículos que realizan el adelantamiento en cola de otros vehículos debido a su elevada IMD.

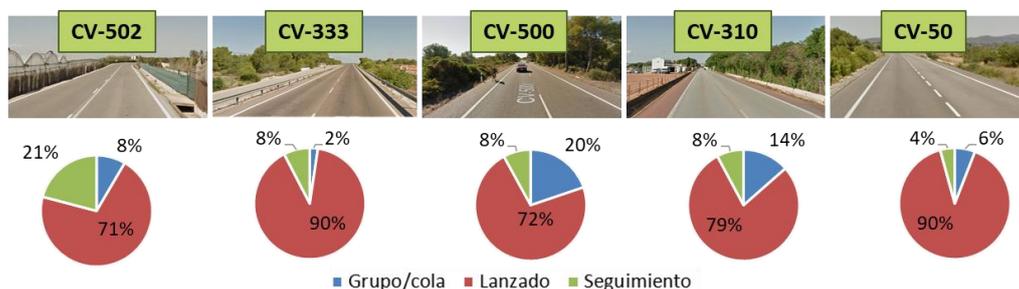


Figura 46. Porcentaje de adelantamientos registrados según tipo de maniobra para cada tramo de estudio

La Figura 47 muestra los porcentajes de cada tipo de maniobra considerando los diferentes grupos de ciclistas que recorrieron los tramos de estudio. Se observa que los mayores porcentajes de maniobras realizadas desde el seguimiento corresponden a las configuraciones que circulan en paralelo y a los grupos más grandes de ciclistas. Este resultado es debido a que es más complicado adelantar a grupos formados por un mayor número de ciclistas, y a que cuando el grupo circula en paralelo ocupa un mayor volumen en la calzada, siendo más complicado para los vehículos realizar adelantamientos lanzados y forzando más maniobras de seguimiento que cuando los grupos circulan en línea.

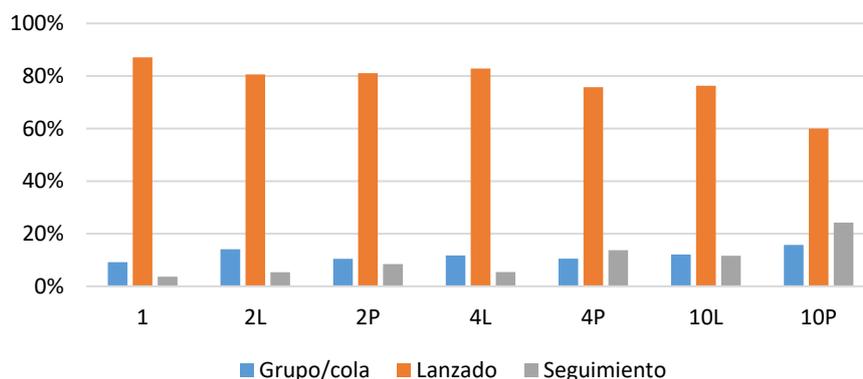


Figura 47. Porcentaje de adelantamientos registrados según tipo de maniobra para cada configuración del grupo de ciclistas.

5.1.1.4 Tipo de línea de separación de sentidos

En el proceso de reducción de datos se registró el tipo de línea de separación de sentidos central de la calzada en el punto donde se realizó cada adelantamiento. Esta línea de separación de sentidos puede ser continua o discontinua, indicando la posibilidad de realizar adelantamientos entre vehículos motorizados. El Reglamento General de Circulación permite realizar adelantamientos a ciclistas incluso en línea continua si existe suficiente visibilidad (Ministerio del Interior, 2003).

En la Figura 48 se indica sobre la imagen de cada sección el porcentaje de línea continua que presenta cada tramo de estudio. En la carretera CV-500 todo el tramo dispone de línea continua debido a las características especiales de este tramo en cuanto a su elevada IMD y a su trazado por un parque natural. Los resultados presentan un mayor aprovechamiento de la línea discontinua en secciones más desfavorables, como la CV-502, donde el arcén es nulo. En el resto

de carreteras se observa que los adelantamientos se realizaron indistintamente en línea continua y discontinua.

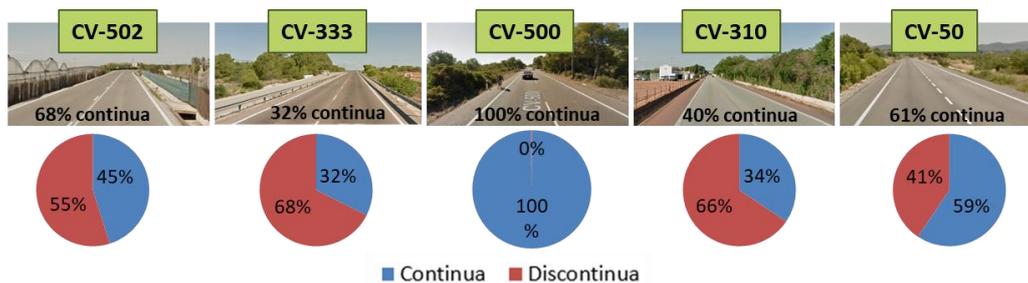


Figura 48. Porcentaje de adelantamientos registrados según línea central para cada tramo de estudio.

En cuanto a las configuraciones de ciclistas los adelantamientos se registraron en su mayoría en línea discontinua, pero el porcentaje de adelantamientos realizados en zonas de línea continua fue también elevado, de manera que en general se produjeron indistintamente según el tipo de línea de separación de sentidos (Figura 49).

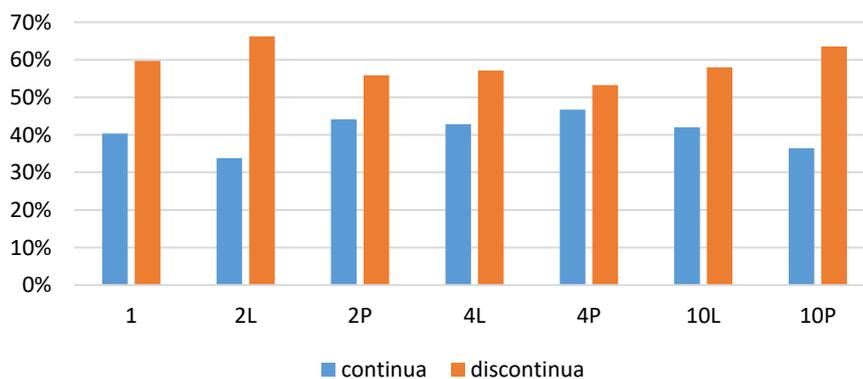


Figura 49. Porcentaje de adelantamientos registrados según tipo de línea central para cada configuración del grupo de ciclistas.

5.1.1.5 Visibilidad del vehículo opuesto

Otra variable analizada en este estudio fue la presencia de un vehículo circulando en sentido opuesto visible durante la maniobra de adelantamiento. Esta variable se registró teniendo en cuenta el tiempo de aparición del opuesto observado desde la cámara frontal de la primera bicicleta del grupo, el cual se comparó con el tiempo de inicio de la maniobra, indicando la visibilidad del opuesto en el momento del inicio de la maniobra.

En la Figura 50 se presentan los porcentajes de adelantamientos según la presencia de un vehículo en sentido opuesto para los cinco tramos de carretera estudiados. Se observa que en la mayoría de los tramos las maniobras se realizaron sin presencia de un vehículo opuesto. En la CV-500 el elevado tráfico motorizado, la sección favorable y la restricción de velocidad límite a 60 km/h generó un elevado porcentaje de adelantamientos realizados con opuesto visible.

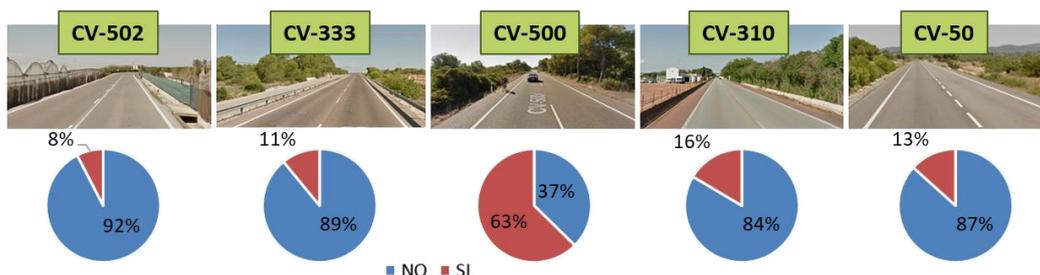


Figura 50. Porcentaje de Adelantamientos registrados según visibilidad del opuesto para cada tramo de estudio

En cuanto a las configuraciones de ciclistas, los adelantamientos se llevaron a cabo en su mayoría sin opuesto visible. Particularmente en los grupos formados por un mayor número de ciclistas no se ha registrado ningún adelantamiento con un vehículo opuesto visible (Figura 51).

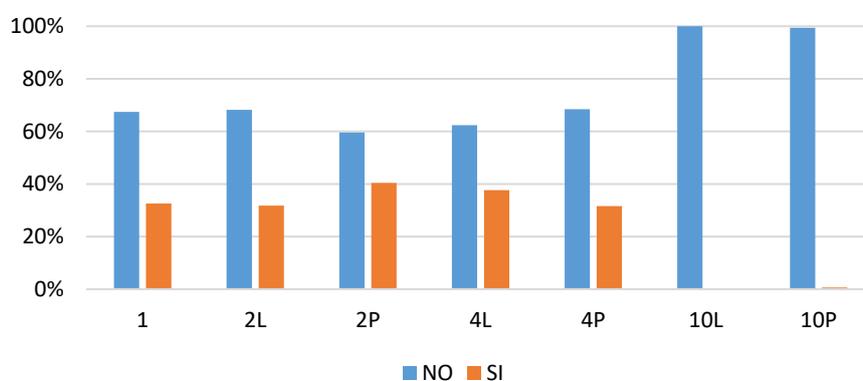


Figura 51. Porcentaje de Adelantamientos registrados según visibilidad del opuesto para cada configuración del grupo de ciclistas.

5.1.1.6 Invasión del carril opuesto durante la maniobra

La invasión del carril opuesto durante la maniobra de adelantamiento a ciclistas es una variable muy importante desde el punto de vista de la seguridad, ya que en carreteras convencionales el carril opuesto está destinado a la circulación de vehículos en sentido contrario, y al circular por él los vehículos adelantantes existe riesgo de colisión frontal con los opuestos.

La invasión del carril opuesto se registró considerando tres posibles valores: la no invasión, la invasión parcial y la invasión total. En la Figura 52 se muestran los porcentajes de cada tipo de invasión por tramo de carretera estudiado. En carreteras estrechas sin arcén la invasión del carril opuesto se realizó en prácticamente todos los adelantamientos registrados, mientras que carreteras más anchas presentaron mayores porcentajes de no invasión.

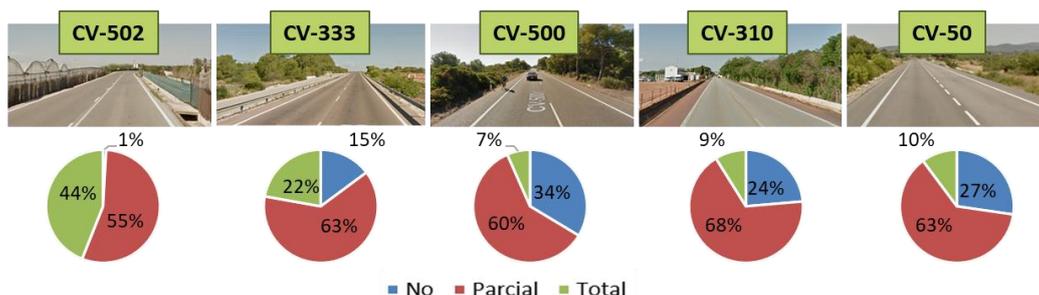


Figura 52. Porcentaje de adelantamientos registrados según invasión del carril opuesto para cada tramo de estudio.

La Figura 53 muestra los porcentajes de invasión del carril opuesto durante el adelantamiento según la configuración del grupo de ciclistas adelantado. Se observa que para grupos formados por un mayor número de ciclistas la invasión fue mayor. También se observa que cuando los grupos circularon en paralelo se produjo una mayor invasión del carril opuesto debido a la ocupación de un mayor volumen de los ciclistas en la calzada.

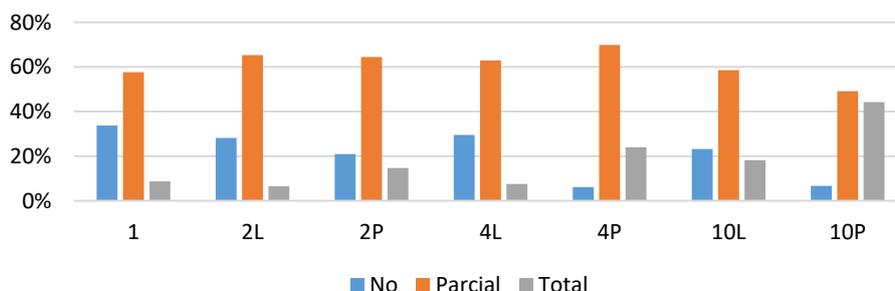


Figura 53. Porcentaje de Adelantamientos registrados según invasión del carril opuesto para cada configuración del grupo de ciclistas.

5.1.1.7 Alineación en planta

Se han considerado tres tipos de alineaciones en planta en las que se producen las maniobras de adelantamiento correspondientes a recta, curva derecha y curva izquierda. En las curvas la visibilidad es más reducida que en rectas, y esto podría generar adelantamientos más peligrosos.

Se han calculado los porcentajes del tipo de alineamiento en planta en los que se registraron los adelantamientos para cada tramo de estudio (Figura 54). Se observa que la gran mayoría de los adelantamientos se realizaron en rectas, sobre todo en los tramos de carretera con menor ancho del arcén. Solamente el tramo de la CV-50 presentó mayores porcentajes de adelantamientos realizados en curvas debido a su sección transversal más favorable y a su mejor visibilidad en general.

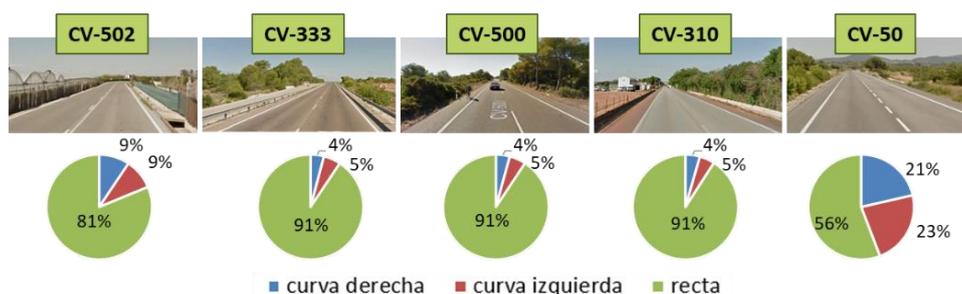


Figura 54. Porcentajes de adelantamientos registrados según alineación en planta para cada tramo de estudio.

Las alineaciones en planta donde se realizaron los adelantamientos para cada grupo de ciclistas se muestran en la Figura 55, se observa para todas las configuraciones del grupo de ciclistas un mayor porcentaje de adelantamientos realizados en rectas. No obstante, para el grupo de 10 ciclistas circulando en línea si se observa un menor porcentaje de adelantamientos realizados en curvas debido a su mayor longitud que implica una mayor distancia de visibilidad necesaria para realizar el adelantamiento.

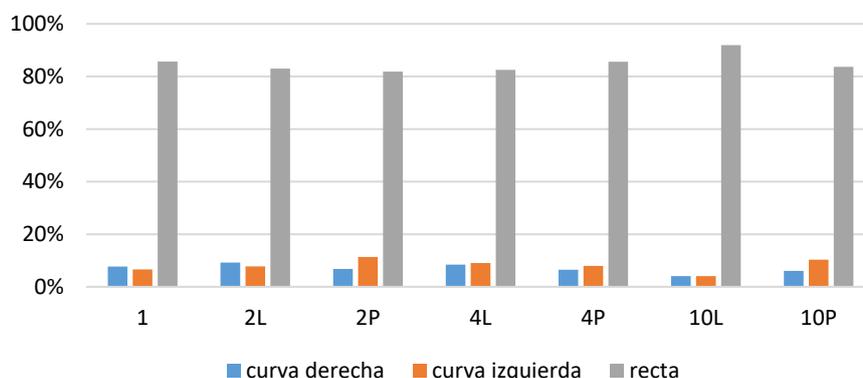


Figura 55. Porcentajes de adelantamientos registrados según alineación en planta para cada configuración del grupo de ciclistas.

5.1.1.8 Velocidad del vehículo adelantante durante la maniobra

La velocidad del vehículo adelantante durante la maniobra de adelantamiento a los ciclistas se calculó mediante los registros de velocidades relativas aportados por los dispositivos láser colocados en las bicicletas y las velocidades de los ciclistas registradas por los GPS de las cámaras.

En la Figura 56 se muestran las distribuciones de velocidades del vehículo adelantante para los diferentes tramos de carretera estudiados. Se observaron mayores velocidades en la carretera CV-50, la cual presenta un límite de velocidad de 100 km/h, siendo el más elevado de los tramos de carretera estudiados. Las menores velocidades se registraron en la CV-500, que presenta un límite de velocidad de 60 km/h, correspondiente al tramo con menor velocidad límite de los estudiados. En general, las velocidades del vehículo adelantante registradas en cada tramo son proporcionales a la velocidad límite de carretera en el que se desarrolló el estudio.

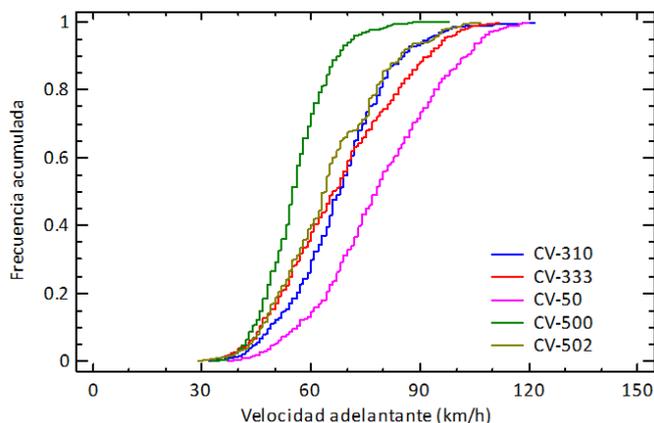


Figura 56. Distribución de velocidades del adelantante registradas para cada tramo de estudio.

Se calcularon las velocidades medias durante el adelantamiento registradas en cada tramo de carretera, esta información se muestra en la Tabla 14 junto con la velocidad límite de cada tramo de estudio. En todos los casos la velocidad media de los vehículos adelantantes fue menor que la velocidad límite de la carretera.

Tramo de carretera	CV-502	CV-333	CV-500	CV-310	CV-50
Velocidad límite (km/h)	70	80	60	80	100
Velocidad media del adelantante (km/h)	64.83	67.75	55.70	67.88	78.79

Tabla 14. Velocidades medias del vehículo adelantante registradas y velocidad límite para cada tramo de estudio.

En la Figura 57 se observan las velocidades registradas de los vehículos adelantantes según la configuración del grupo de ciclistas adelantado. En general se registraron menores velocidades cuando los grupos circulaban en paralelo, y la mayor velocidad media registrada fue al adelantar al grupo de mayor longitud, 10 ciclistas en línea.

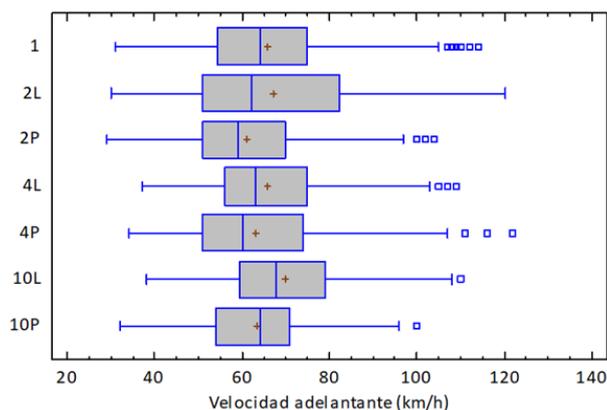


Figura 57. Datos de velocidades del adelantante registradas según configuración del grupo de ciclistas.

5.1.1.9 Separación lateral durante el adelantamiento

Los datos registrados por los dispositivos láser colocados en las bicicletas también permitieron calcular la separación lateral entre el vehículo adelantante y las bicicletas durante la maniobra de adelantamiento.

La Figura 58 muestra las distribuciones de las separaciones laterales registradas en cada tramo de estudio. Las menores separaciones se registraron en la CV-500, esta carretera presenta una

restricción de la velocidad límite a 60 km/h, y un elevado nivel de tráfico. Las mayores separaciones se registraron en la CV-50, con una sección favorable y una velocidad límite de 100 km/h.

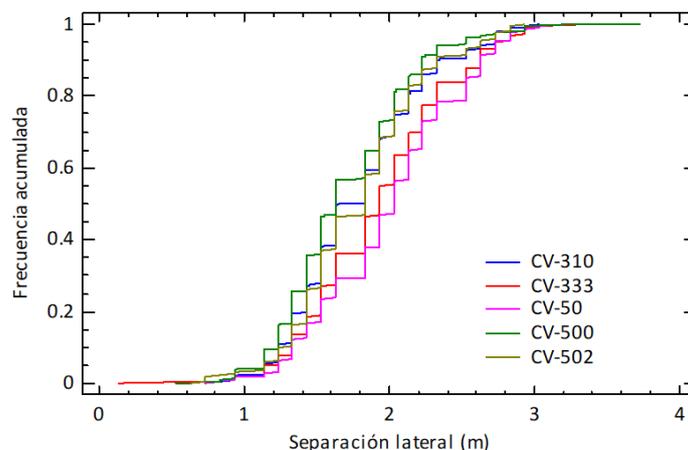


Figura 58. Distribución de separaciones laterales registradas para cada tramo de estudio.

En la Tabla 15 se muestran los valores medios de las separaciones laterales para cada tramo de estudio y el ancho de la semiplataforma, formada por el carril y el arcén. No se aprecia una relación clara entre el ancho de la semiplataforma y la separación lateral, indicando que depende de otros factores.

Tramo de carretera	CV-502	CV-333	CV-500	CV-310	CV-50
Ancho de la semiplataforma (carril+arcén) (m)	3.5	4.2	4.5	4.7	5.0
Separación lateral media (m)	1.79	1.93	1.70	1.79	2.00

Tabla 15. Separaciones laterales medias registradas y ancho de la semiplataforma para cada tramo de estudio.

En cuanto a las configuraciones de los grupos de ciclistas las separaciones laterales son generalmente mayores cuando estos grupos circulan en línea, debido a que ocupan un menor volumen en la calzada. La mayor separación lateral media se registró para el grupo de 10 ciclistas circulando en línea (Figura 59).

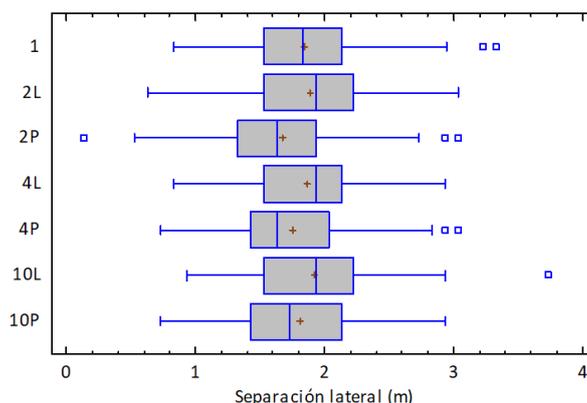


Figura 59. Datos estadísticos de separaciones laterales registradas según configuración del grupo de ciclistas.

En este apartado se ha analizado el porcentaje de no cumplimiento de la separación lateral mínima de 1.5 m exigida por el Reglamento General de Circulación. En la Tabla 16 se muestran los porcentajes de no cumplimiento del 1.5 m para cada tramo de carretera estudiado. En

promedio, en un 27% no se cumple la separación lateral de 1.5 m. Este porcentaje es mayor en la CV-500, donde se han registrado las separaciones laterales menores.

Tramo de carretera	CV-502	CV-333	CV-500	CV-310	CV-50
No cumplimiento del 1.5 m de separación lateral	26%	19%	36%	28%	17%

Tabla 16. Porcentaje de no cumplimiento de la separación mínima por tramo de estudio.

La Figura 60 muestra el porcentaje de no cumplimiento de la distancia mínima de 1.5 m según las configuraciones del grupo de ciclistas adelantado. Se observa un mayor incumplimiento de la distancia mínima en adelantamientos realizados a los grupos de ciclistas que circulaban en configuraciones en paralelo.

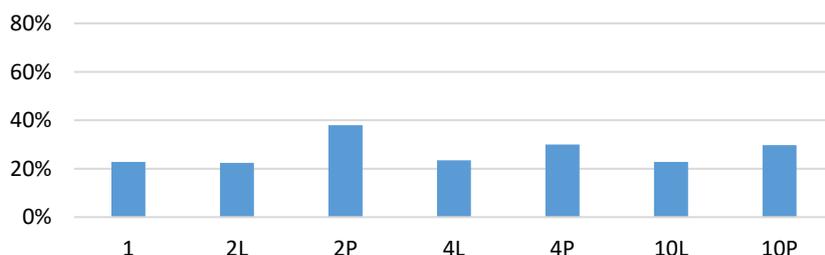


Figura 60. Porcentaje de no cumplimiento de la separación mínima de 1.5 m por configuración del grupo de ciclistas.

5.1.1.10 Duración de la maniobra de adelantamiento

La duración en tiempo de la maniobra de adelantamiento a los ciclistas es una variable muy importante, ya que mayores duraciones pueden suponer un mayor riesgo de colisión frontal con los opuestos, y duraciones muy pequeñas pueden suponer adelantamientos más peligrosos por realizarse más rápido y más cerca de los ciclistas.

La Figura 61 muestra las duraciones medias del adelantamiento y los intervalos LSD por configuración del grupo de ciclistas y por tramo de carretera estudiado. Se observan mayores duraciones medias para grupos formados por un mayor número de ciclistas. No se aprecian diferencias elevadas para los grupos circulando en línea o en paralelo. En cuanto al tramo de carretera se observa mayores duraciones en general para tramos más desfavorables, con calzadas más estrechas como es el caso de la CV-502 y la CV-333. El tramo de la CV-310 presenta duraciones menores de las esperadas según sus características de ancho de calzada, esto puede deberse al hecho de tener los arcenes coloreados de rojo.

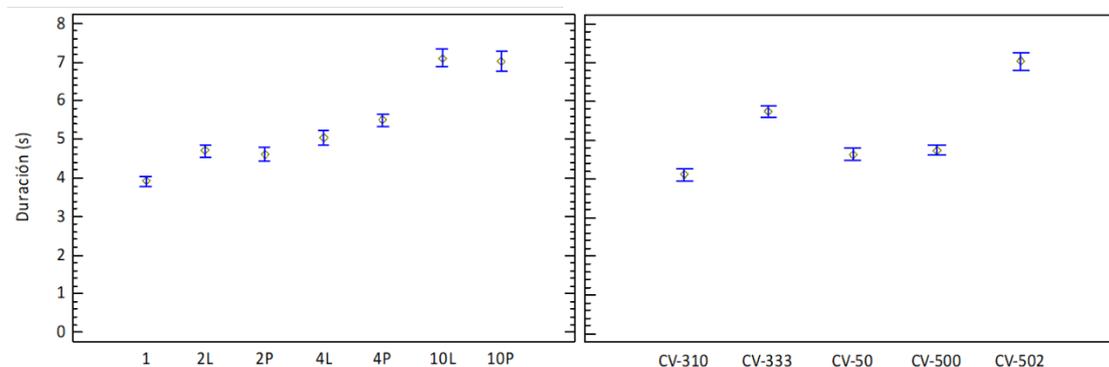


Figura 61. Duración media del adelantamiento e intervalos LSD de Fisher por configuración del grupo de ciclistas (izda) y por tramo de estudio (dcha).

El análisis de la duración del adelantamiento se realiza con mayor profundidad en el apartado 5.9.2, donde se desarrolla un modelo predictivo de la duración del adelantamiento.

5.1.2 Modelización de la duración del adelantamiento a ciclistas

En este apartado se presentan los resultados de la modelización de la duración del adelantamiento a los ciclistas considerando factores relativos al grupo de ciclistas, a la carretera y a la propia maniobra de adelantamiento.

Debido a las diferencias observadas respecto al tipo de maniobra de adelantamiento se han desarrollado dos modelos de la duración de la maniobra según se trate de maniobras lanzadas o en seguimiento. Estos modelos se han basado en las observaciones realizadas en los tramos de estudio mediante los recorridos de las bicicletas instrumentadas. Se han considerados los datos recogidos en los cinco tramos de estudio y con las siete configuraciones de los grupos de ciclistas presentadas anteriormente.

5.1.2.1 Análisis descriptivo de datos observados

Se ha partido de los datos de maniobras de adelantamiento realizadas por vehículos motorizados ligeros y en las que todas las variables necesarias para el desarrollo del modelo estén registradas correctamente. Así, la base de datos para la modelización de la duración del adelantamiento a ciclistas está compuesta por 2,028 maniobras de adelantamiento correctamente registradas, con datos de velocidades y de separaciones laterales.

Las maniobras lanzadas representaron el 79% de estos adelantamientos (1,592 maniobras), mientras que el 9% (192) fueron maniobras de seguimiento. El resto fueron maniobras en grupo o cola, donde el vehículo adelantó mientras seguía a otro vehículo. Las maniobras de grupo o cola fueron excluidas del análisis debido a la participación del vehículo líder, que pudo haber afectado el comportamiento del conductor.

La distribución de la duración de los adelantamientos para cada estrategia de adelantamiento se muestra en la Figura 62. El valor medio de la duración de los adelantamientos para las maniobras lanzadas fue de 4.81 s, con una desviación (SD) de 2.41 s; mientras que, para las maniobras en seguimiento, la duración media de los adelantamientos fue de 6.88 s con una desviación (SD) de 2.26 s. Generalmente, las maniobras lanzadas presentaron una menor duración de adelantamiento respecto a las de seguimiento. Esto se explica por el hecho de que las maniobras en seguimiento parten de un estado de seguimiento a las bicicletas, por lo que suelen realizarse a menor velocidad ya que su velocidad inicial es cercana a la de los ciclistas.

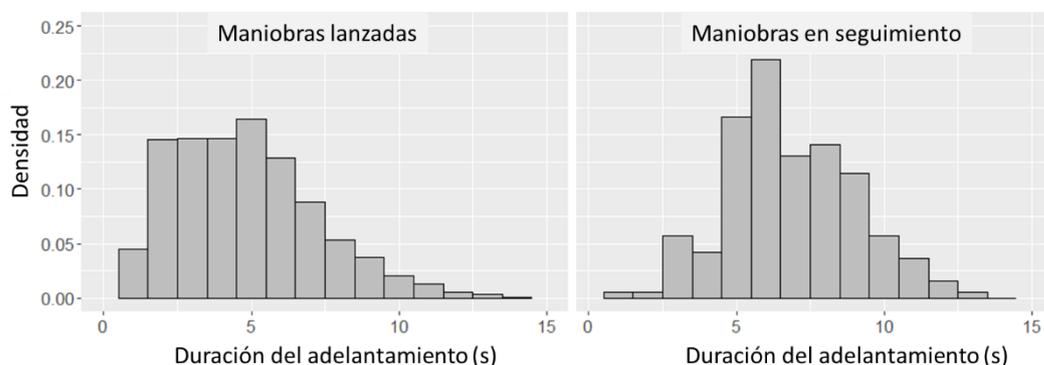


Figura 62. Distribución de las duraciones del adelantamiento (s) registradas para cada tipo de maniobra de adelantamiento.

La Tabla 17 muestra los resultados de las duraciones del adelantamiento obtenidos a partir de las observaciones en campo con las bicicletas instrumentadas. Estos resultados se presentan para cada tipo de maniobra de adelantamiento y considerando cada una de las variables y sus valores.

Variables	Maniobras lanzadas				Maniobras en seguimiento			
	Obs.		Duración (s)		Obs.		Duración (s)	
	N	(%)	Media	SD	N	(%)	Mean	SD
Ancho de carril (m)								
3	482	30%	4.38	2.29	60	31%	6.23	1.96
3.2	726	46%	4.80	2.45	73	38%	7.30	2.55
3.5	384	24%	5.35	2.38	59	31%	7.00	2.04
Ancho de arcén (m)								
0	136	9%	6.99	2.26	44	23%	7.32	2.10
1	389	24%	5.62	2.46	36	19%	7.97	2.70
1.5	1067	67%	4.23	2.15	112	58%	6.35	2.01
Velocidad límite (km/h)								
60	482	30%	4.38	2.29	60	31%	6.23	1.96
70	136	9%	6.99	2.26	44	23%	7.32	2.10
80	726	46%	4.80	2.45	73	38%	7.30	2.55
100	248	16%	4.46	1.93	15	8%	6.07	1.58
IMD (vehículos/día)								
4733	136	9%	6.99	2.26	44	23%	7.32	2.10
4797	248	16%	4.46	1.93	15	8%	6.07	1.58
5542	337	21%	3.86	2.07	37	19%	6.65	2.25
6380	389	24%	5.62	2.46	36	19%	7.97	2.70
16310	482	30%	4.38	2.29	60	31%	6.23	1.96
Número de ciclistas								
1	366	23%	3.73	2.04	17	9%	5.76	1.86
2	542	34%	4.42	2.15	51	27%	6.16	2.06
4	466	29%	5.05	2.25	65	34%	6.66	2.07
10	218	14%	7.03	2.40	59	31%	8.05	2.29
Configuración del grupo								
Línea	1019	64%	4.62	2.45	78	41%	7.21	2.35
Paralelo	573	36%	5.14	2.30	114	59%	6.65	2.18
Alineación horizontal								
Curva izquierda	126	8%	4.31	2.05	25	13%	7.04	2.09
Curva derecha	123	8%	4.28	2.15	9	5%	6.67	1.12
Recta	1343	84%	4.90	2.45	158	82%	6.86	2.34
Presencia de vehículo opuesto								
No	1096	69%	5.34	2.45	154	80%	7.21	2.25
Si	496	31%	3.62	1.84	38	20%	5.53	1.77
Invasión del sentido opuesto								
No	368	23%	2.86	1.62	13	7%	4.77	2.20
Parcial	1024	64%	5.04	2.15	117	61%	6.43	1.94
Total	200	13%	7.18	2.18	62	32%	8.16	2.20
Velocidad del adelantante								
km/h	Media = 67.43			SD = 15.63	Media = 50.03			SD = 9.65
Separación lateral								
m	Media = 1.81			SD = 0.48	Media = 1.94			SD = 0.49

Tabla 17. Resultados de la duración del adelantamiento a partir de observaciones en campo para maniobras lanzadas y en seguimiento.

En la Tabla 17 se pueden observar diferentes tipos de relaciones entre la duración del adelantamiento y las variables. Existen algunas variables para las que un aumento en ellas produce un claro aumento de la duración del adelantamiento, como el número de ciclistas que forman el grupo, mientras que otras variables no presentan una relación evidente con la duración, como la velocidad límite o la IMD de cada carretera.

5.1.2.2 Modelos de duración del adelantamiento

Los ocho modelos definidos en la metodología fueron ajustados para los dos tipos de maniobras, lanzadas y en seguimiento.

Previamente se ajustaron otros modelos considerando un número menor de factores. Como ejemplo, en la Tabla 18 se muestran los valores obtenidos a partir del ajuste de cuatro modelos previos en los que solamente se consideraron cuatro y cinco factores y dos distribuciones de la variable respuesta.

Estos modelos previos se ajustaron para los dos tipos de maniobras de adelantamiento: lanzadas y en seguimiento. En la Tabla 18 se muestra el diseño de estos modelos previos y los resultados de elpd_loo y su error estándar asociado obtenidos a partir de aplicar la LOOCV a estos modelos previos.

Factores	Lanzadas				En seguimiento			
	PR1F	PR2F	PR3F	PR4F	PR1A	PR2A	PR3A	PR4A
Lane	X	X	X	X	X	X	X	X
Shoulder	X	X	X	X	X	X	X	X
Slimit		X		X		X		X
Cyclists	X	X	X	X	X	X	X	X
Conf	X	X	X	X	X	X	X	X
Distribución funcional	1	1	2	2	1	1	2	2
elpd_loo	-3381.1	-3375.9	-3342.4	-3335.3	-426.7	-424.6	-415.1	-408
SE	28.7	29.3	27.6	28.4	14.2	13.9	10	9

Tabla 18. Diseño de modelos previos para la duración del adelantamiento en maniobras lanzadas y en seguimiento según factores considerados. Distribución funcional: 1 lognormal;2 Weibull. Resultados de la LOOCV aplicada a estos modelos previos.

Los modelos previos ajustados ofrecieron peores resultados, y además contaban con un número más reducido de factores limitando el fin descriptivo de los modelos, resultando los ocho modelos descritos a continuación los que mejor ajuste presentaron.

Todos los modelos presentaron una convergencia admisible con elevados tamaños de muestras efectivas. Los gráficos de resultados se inspeccionaron visualmente, y ninguno de ellos mostró signos de divergencias. Los valores de Rhat iguales a 1 sugirieron una convergencia adecuada de las series (Bürkner, 2017).

La Tabla 19 muestra los resultados del proceso de LOOCV para los ocho modelos ajustados para las maniobras lanzadas, mientras que la Tabla 20 muestra los resultados del LOOCV para los ocho modelos ajustados para las maniobras en seguimiento.

En estas tablas elpd_loo corresponde con la estimación Bayesiana de la densidad logarítmica predictiva esperada; p-loo corresponde con la diferencia entre elpd_loo y la densidad logarítmica predictiva posterior no validada de forma cruzada, describe cuánto más difícil es predecir datos futuros que los datos observados; looic representa el criterio de información de loo, y es equivalente a $-2 \cdot \text{elpd_loo}$; finalmente SE representa el error estándar de cada uno de los valores calculados.

5.1 Análisis de la maniobra de adelantamiento a ciclistas

	M1F	M2F	M3F	M4F	M5F	M6F	M7F	M8F
elpd_loo	-3283.0	-3282.1	-3316.9	-3158.0	-3153.4	-3141.4	-3131.4	-3999.6
SE	28.1	28.1	30.5	33.4	32.9	32.7	33.0	21.4
p_loo	11.9	12.8	12.0	14.9	11.9	16.4	13.2	1.9
SE	1.0	1.1	0.6	2.0	0.5	2.0	0.6	0.1
loaic	6566.1	6564.1	6633.8	6316.0	6306.7	6282.8	6262.8	7999.3
SE	56.1	56.1	61.0	66.8	65.9	65.5	65.9	42.7

Tabla 19. Resultados del leave-one-out-cross-validation (LOOCV) para los ocho modelos ajustados de las maniobras lanzadas.

	M1A	M2A	M3A	M4A	M5A	M6A	M7A	M8A
elpd_loo	-410.3	-409.5	-423.5	-403.8	-409	-397.7	-400	-564.4
SE	9.1	9.2	13.3	10	12.6	10.2	12.9	4.8
p_loo	9.9	10.9	11.7	13	12.2	13.8	13	1.3
SE	1.2	1.4	2.2	2.6	2.2	2.9	2.3	0.1
loaic	820.7	819	847.1	807.6	818.1	795.3	800	1128.8
SE	18.2	18.3	26.6	20.0	25.2	20.4	25.8	9.6

Tabla 20. Resultados del leave-one-out-cross-validation (LOOCV) para los ocho modelos ajustados de las maniobras en seguimiento.

Los resultados de la comparación de los modelos, utilizando la LOOCV, para cada tipo de maniobra se muestran en la Tabla 21.

Maniobras lanzadas			Maniobras en seguimiento		
Modelo	ELPD_dif	SE_dif	Modelo	ELPD_dif	SE_dif
M7F	-	-	M6A	-	-
M6F	-10	17.5	M7A	-2.3	7.7
M5F	-22	7	M4A	-6.1	3.4
M4F	-26.6	19.7	M5A	-11.4	7.8
M2F	-150.7	22.8	M2A	-11.8	7
M1F	-151.6	22.9	M1A	-12.7	6.9
M3F	-185.5	18.1	M3A	-25.9	10.4
M8F	-868.3	27.5	M8A	-166.7	10.2

Tabla 21. Resultados de la comparación de modelos Bayesianos utilizando la leave-one-out-cross-validation (LOOCV). M7F y M6A fueron utilizados como base para las comparaciones.

Los resultados mostraron que el mejor modelo para las maniobras lanzadas fue el M7F. Este modelo incluye todos los factores considerados y la distribución log-normal. Para las maniobras en seguimiento, los modelos M6A y M7A presentaron los mejores resultados, existiendo una mínima diferencia entre ellos. De hecho, la diferencia en ELPD estuvo dentro del rango del error estándar para M6 y M7 en ambos tipos de maniobras. Por lo tanto, las distribuciones log-normal y Weibull resultaron en buenos ajustes de los modelos de duración de adelantamiento.

Para comparar los resultados de ambos tipos de maniobra, se seleccionó para las maniobras en seguimiento el modelo M7A para incrementar el paralelismo con el modelo relativo a las maniobras lanzadas (ya que los modelos M7F y M7A incluían los mismos factores y tenían la misma distribución).

Estos dos modelos fueron validados mediante el uso del método de 10-fold-cross validation. En la Tabla 22 se muestran los resultados obtenidos del RMSE para cada una de las 10 iteraciones de validación.

	K=1	K=2	K=3	K=4	K=5	K=6	K=7	K=8	K=9	K=10	Total
RMSE M7F (s)	2.12	1.78	1.95	1.68	1.88	1.62	1.94	1.98	1.67	2.19	1.88
RMSE M7A (s)	1.91	1.51	1.68	1.69	2.23	1.60	2.57	1.70	1.97	1.77	1.86

Tabla 22. Resultados de cada iteración de validación mediante el método de 10-fold-cross validation para los dos modelos seleccionados.

El RMSE promedio obtenido después de la validación mediante el uso del método de 10-fold cross validation fue de 1.88 s para maniobras lanzadas (M7F) y 1.86 s para maniobras en seguimiento (M7A).

Para cada modelo seleccionado se analizaron sus gráficos de trazas y de densidad de cada parámetro (Figura 63 y Figura 64). Los gráficos de trazas muestran los valores que toma el parámetro durante la ejecución de la cadena. En todos ellos se observa que todos los parámetros convergen correctamente. Los gráficos de densidad posterior corresponden con el histograma de los valores del gráfico de trazas, son las distribuciones de los valores del parámetro en la cadena. Todos ellos indican que los parámetros de cada modelo convergen correctamente.

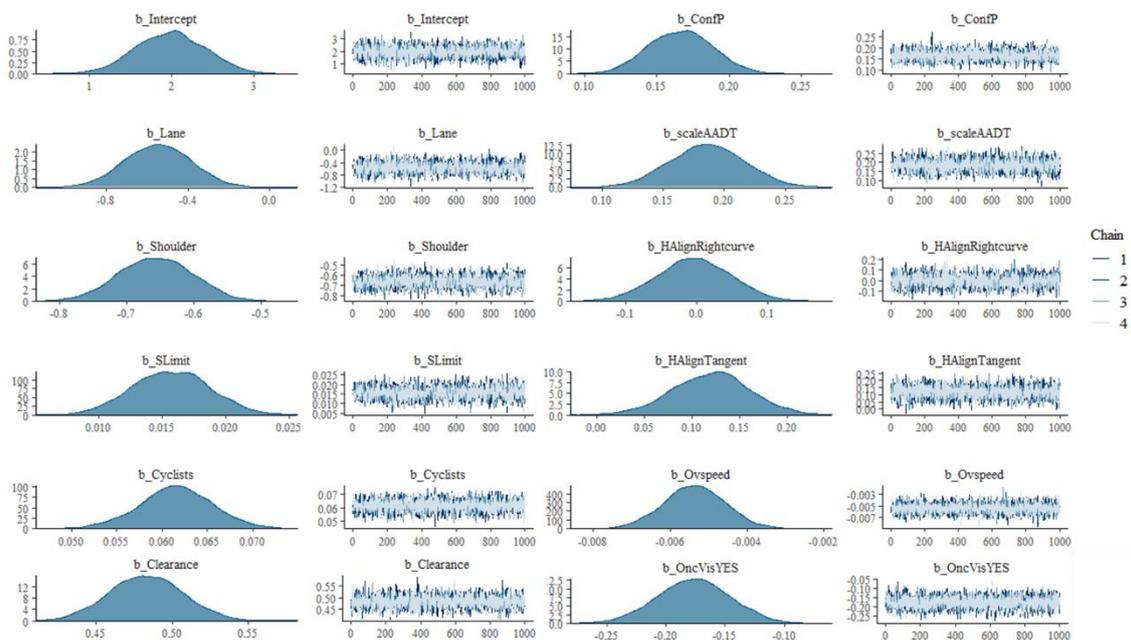


Figura 63. Gráficos de densidad y de trazas para cada parámetro para el modelo de duración del adelantamiento de maniobras lanzadas (M7F).

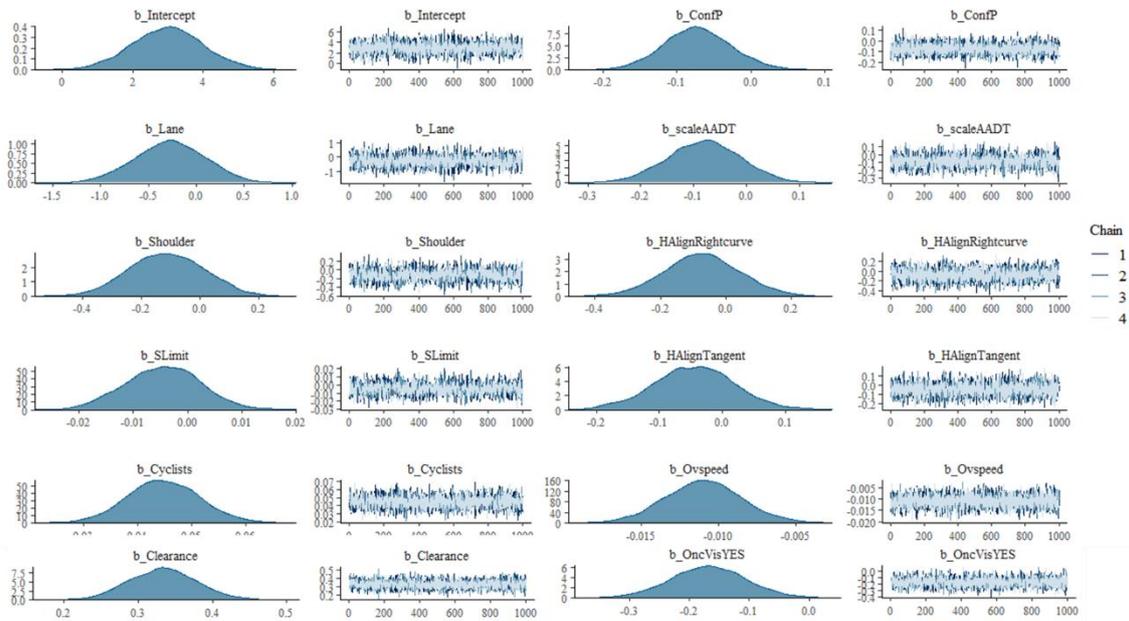


Figura 64. Gráficos de densidad y de trazas para cada parámetro para el modelo de duración del adelantamiento de maniobras en seguimiento (M7A).

Las distribuciones posteriores de los parámetros (media, error estándar e intervalo de credibilidad del 95%) se muestran en la Tabla 23 para el modelo de maniobras lanzadas y en la Tabla 24 para el modelo de las maniobras en seguimiento. En estas dos tablas se observa que todos los parámetros convergieron correctamente, sin mostrar signos de divergencias. Los valores del Rhat iguales a uno demuestran la correcta convergencia de las series, mientras que los valores de Bulk y Tail suponen un elevado tamaño de muestras efectivas.

El modelo para maniobras lanzadas tuvo una estimación media de R^2 bayesiano más alta en comparación con el modelo de maniobras en seguimiento, sin embargo, los dos valores se encontraron dentro de la incertidumbre de la estimación (Tabla 23 y Tabla 24).

M7F	Media	SE	I-95% CI	u-95% CI	Rhat	Bulk_ESS	Tail_ESS
R^2 Bayesiano	0.55	0.01	0.53	0.57			
Parámetros							
β_0	1.98	0.42	1.14	2.79	1	3087	2815
β_{Lane}	-0.55	0.16	-0.86	-0.23	1	2553	2777
$\beta_{Shoulder}$	-0.66	0.05	-0.76	-0.55	1	2317	2789
β_{SLimit}	0.02	0.00	0.01	0.02	1	2318	2598
$\beta_{scaleAADT}$	0.19	0.03	0.13	0.25	1	5264	3094
$\beta_{Cyclists}$	0.06	0.00	0.05	0.07	1	4417	2766
β_{ConfP}	0.17	0.02	0.12	0.21	1	3265	3014
$\beta_{HAlignRight}$	0.00	0.05	-0.10	0.10	1	3837	2853
$\beta_{HAlignTangent}$	0.12	0.04	0.04	0.20	1	3727	2668
β_{OncVis}	-0.18	0.03	-0.24	-0.12	1	4000	2752
$\beta_{Ovspeed}$	-0.01	0.00	-0.01	0.00	1	4380	2396
$\beta_{Clearance}$	0.48	0.02	0.44	0.53	1	4433	2969
σ	0.41	0.01	0.40	0.43	1	5288	2692

Tabla 23. Distribución de los parámetros del modelo de duración del adelantamiento para maniobras lanzadas. Media, SE y valores mínimos y máximos del intervalo de credibilidad del 95% para cada parámetro. σ es el parámetro de la distribución log-normal.

M7A	Media	SE	l-95% CI	u-95% CI	Rhat	Bulk_ESS	Tail_ESS
R ² Bayesiano	0.47	0.04	0.39	0.54			
Parámetros							
β_0	2.99	1.01	1.04	4.97	1	2402	2803
β_{Lane}	-0.27	0.37	-1.01	0.45	1	1851	2690
β_{Shoulder}	-0.11	0.13	-0.36	0.13	1	1453	2052
β_{Slimit}	0.00	0.01	-0.02	0.01	1	1445	1883
$\beta_{\text{scaleAADT}}$	-0.08	0.07	-0.22	0.06	1	3482	2994
β_{Cyclists}	0.04	0.01	0.03	0.06	1	3560	3055
β_{ConfP}	-0.07	0.05	-0.16	0.02	1	1854	2149
$\beta_{\text{HAlignRight}}$	-0.07	0.12	-0.30	0.15	1	3690	3165
$\beta_{\text{HAlignTangent}}$	-0.04	0.06	-0.18	0.08	1	3222	2988
β_{OncVis}	-0.17	0.06	-0.29	-0.04	1	4824	2964
β_{Ovspeed}	-0.01	0.00	-0.02	-0.01	1	3989	2979
$\beta_{\text{Clearance}}$	0.33	0.05	0.25	0.42	1	3027	2942
σ	0.29	0.02	0.26	0.32	1	3542	2749

Tabla 24. Distribución de los parámetros del modelo de duración del adelantamiento para maniobras en seguimiento. Media, SE y valores mínimos y máximos del intervalo de credibilidad del 95% para cada parámetro. σ es el parámetro de la distribución log-normal.

En las distribuciones de parámetros presentadas en la Tabla 23 y en la Tabla 24 se puede observar la dirección del efecto de cada factor en la duración del adelantamiento. Sin embargo, su magnitud puede ser difícil de interpretar ya que los coeficientes de regresión están en la escala logarítmica. Para facilitar la interpretación, los efectos se transformaron y se trazaron en la escala original utilizando gráficos de efectos condicionales (Bürkner, 2019).

La Figura 65 muestra los efectos condicionales de cada variable sobre la duración del adelantamiento para las maniobras lanzadas y en seguimiento. Al crear efectos condicionales para una variable en particular, los valores de todas las demás variables se condicionan a la media de las variables numéricas y al nivel de referencia de las variables categóricas. Estos gráficos muestran la respuesta de duración de adelantamiento esperada según lo predicho por el modelo M7F y M7A para maniobras lanzadas y en seguimiento, respectivamente. En la Figura 65, el área sombreada representa los intervalos de credibilidad del 95% alrededor de las estimaciones.

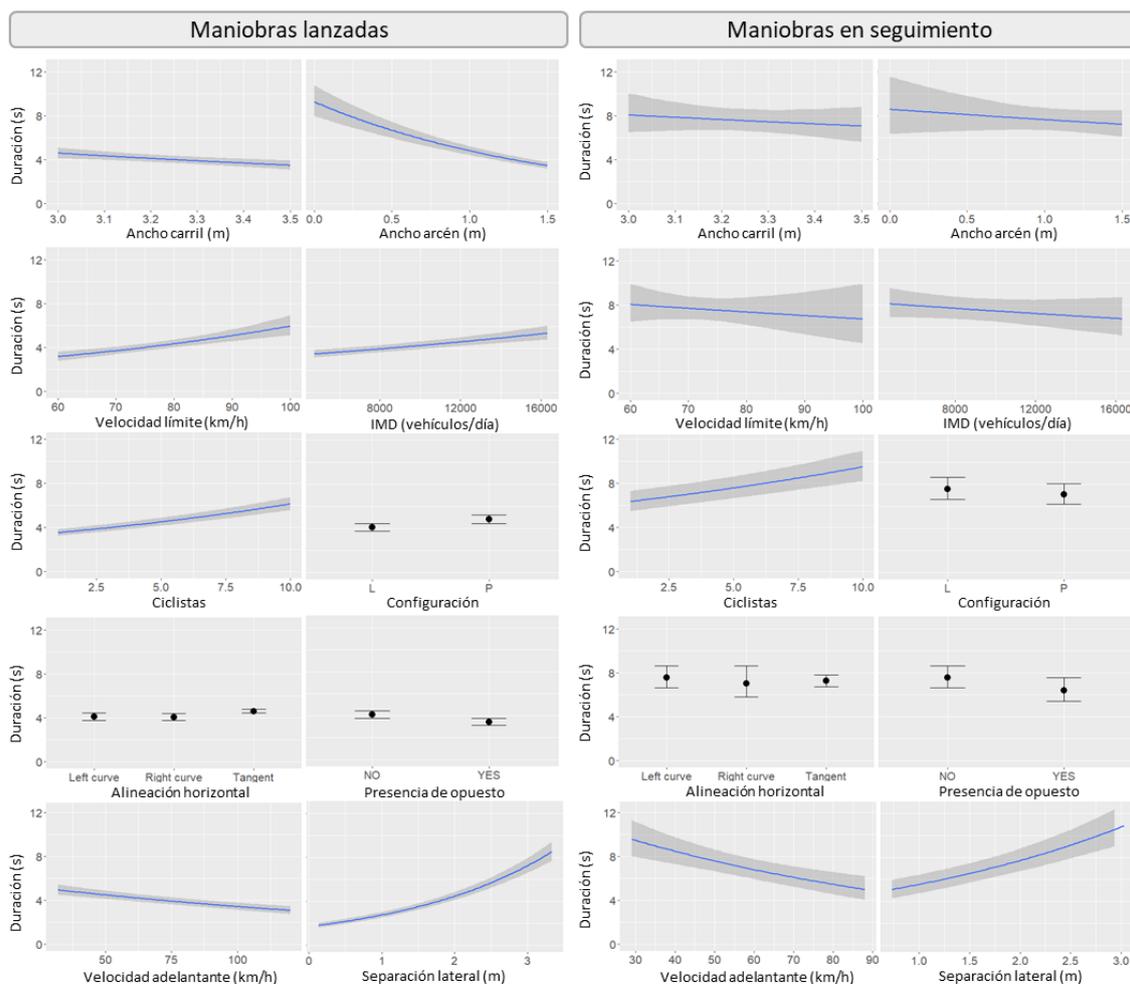


Figura 65. Efectos condicionales de cada variable sobre la duración del adelantamiento para maniobras lanzadas y en seguimiento. El resto de variables se mantienen en el valor de referencia en el caso de variables categóricas y en la media para variables numéricas.

5.1.2.2.1 Modelo de la duración del adelantamiento para maniobras lanzadas

Observando los resultados de las maniobras lanzadas, solamente la distribución de parámetros de la alineación horizontal para los adelantamientos realizados en curva derecha incluye el valor cero dentro del IC del 95% (Tabla 23). Este resultado indica que la duración de los adelantamientos fue similar para los adelantamientos realizados en curva derecha e izquierda, ya que el valor de referencia en este caso es la curva izquierda.

El resto de parámetros de las maniobras lanzadas tienen un efecto notable en la duración del adelantamiento, es decir, sus distribuciones no incluyen el cero. Un aumento en el ancho del carril y el ancho del arcén provoca en una disminución en la duración del adelantamiento. Sin embargo, el ancho del arcén tiene un efecto más pronunciado que el ancho del carril (ver Figura 65). Según los resultados obtenidos, un aumento en el límite de velocidad y en la IMD produce mayores duraciones del adelantamiento.

Teniendo en cuenta el grupo de ciclistas, cuando un grupo estaba formado por un mayor número de ciclistas, la duración del adelantamiento fue mayor, y cuando los ciclistas circulaban en paralelo, la duración del adelantamiento también fue mayor. En cuanto a los factores relacionados con la alineación horizontal, cuando la maniobra se realizó en un tramo recto, la duración del adelantamiento fue mayor que cuando se produjo en una curva. La presencia de

un vehículo en sentido contrario ha provocado una menor duración de adelantamiento. Respecto a la velocidad del vehículo adelantante, se muestra una relación inversa con la duración del adelantamiento. La separación lateral tiene una influencia considerable en la duración del adelantamiento, ya que una mayor separación lateral entre adelantante y ciclistas provoca una mayor duración del adelantamiento.

Los resultados del modelo de duración del adelantamiento para maniobras lanzadas mostraron un efecto opuesto para el ancho de carril que el obtenido a partir de las observaciones. Además, el ancho del carril tiene un efecto débil en comparación con el ancho del arcén. En las observaciones, cuando existe arcén y es transitable, la posición de los ciclistas dentro de la sección transversal de la carretera es diferente a cuando no existe. Estos resultados sugieren que el ancho del carril y el arcén deben considerarse conjuntamente para cada tramo de carretera, ya que es el espacio total donde interactúan conductores y ciclistas, y considerarlo en conjunto puede explicar mejor el fenómeno. Además, considerar solo el ancho del carril puede llevar a resultados erróneos, ya que, en este estudio, los tramos de carretera más estrechos y más anchos tenían el mismo ancho de carril.

Los resultados estadísticos del ancho del carril y del arcén considerados conjuntamente se muestran en la Tabla 25.

Variables	Maniobras lanzadas				Maniobras en seguimiento			
	Obs.		Duración (s)		Obs.		Duración (s)	
	N	(%)	Media	SD	N	(%)	Mean	SD
Ancho de carril+arcén (m)								
3.5	136	9%	6.99	2.26	44	23%	7.32	2.10
4.2	389	24%	5.62	2.46	36	19%	7.97	2.70
4.5	482	30%	4.38	2.29	60	31%	6.23	1.96
4.7	337	21%	3.86	2.07	37	19%	6.65	2.25
5	248	16%	4.46	1.93	15	8%	6.07	1.58

Tabla 25. Valores estadísticos de la duración del adelantamiento (s) según tipo de maniobra y ancho de la semiplataforma (M) a partir de los datos observados.

Se observa como para las maniobras lanzadas los datos observados de la duración del adelantamiento no presentan una relación clara con el ancho de la semiplataforma para las maniobras en seguimiento, mientras que para las maniobras lanzadas se observa una relación tal que a mayor ancho de semiplataforma la duración del adelantamiento es menor. El ancho de la semiplataforma de 4.5 m corresponde al tramo de carretera de la CV-310, con arcenes coloreados de rojo. En este tramo se registraron duraciones menores a las esperadas debido seguramente al efecto del arcén coloreado. Estas observaciones sugirieron contemplar el ancho del carril y del arcén conjuntamente.

Por lo tanto, se ajustó un nuevo modelo (M7FN) considerando los anchos de carril y arcén conjuntamente. Este modelo se basó en el modelo M7F, eliminando las variables de ancho de carril y arcén por separado e introduciendo el ancho de carril y arcén conjuntamente como el ancho de la semiplataforma.

Las distribuciones de los parámetros en el modelo M7FN solo presentaron cambios para el parámetro de intersección ($\beta_{0,M7FN} = 2.32, [2.04, 2.59]$ 95% CI), y la distribución del ancho de la semiplataforma presentó un efecto más fuerte en la duración de adelantamiento que cuando los anchos de carril y arcén se consideraron por separado ($\beta_{LSWidth,M7FN} = -0.68, [-0.78, -0.59]$ 95% CI). M7FN fue ligeramente mejor que M7F dentro del error

estándar, según los resultados de la comparación LOOCV ($ELPD_{diff} = -0.6$, $SE_{diff} = 0.8$), mientras que el R^2 bayesiano fue similar para ambos modelos.

Los efectos condicionales del resto de factores considerados en este modelo fueron iguales al modelo M7F. En la Figura 66 se muestra el efecto condicional del ancho del carril y del arcén considerado conjuntamente en el modelo M7FN.

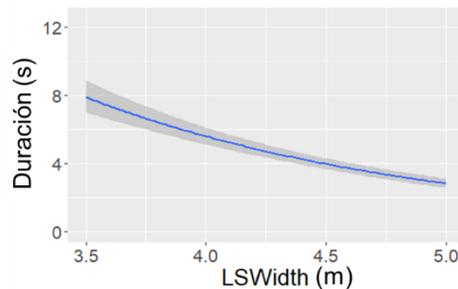


Figura 66. Efecto condicional del ancho de la semiplataforma sobre la duración del adelantamiento en el modelo M7FN.

Se observa que considerar el ancho total donde interactúan ciclistas y conductores presenta mejores resultados que al considerar al carril y el arcén por separado. En este caso, el área sombreada que representa el intervalo de credibilidad es menor que las obtenidas en el modelo M7F representadas en la Figura 65.

5.1.2.2.2 Modelo de la duración del adelantamiento para maniobras en seguimiento
 Las maniobras en seguimiento presentaron un número más elevado de parámetros que incluían el cero en el intervalo de credibilidad del 95%, lo que indica que estos parámetros no han tenido un efecto claro sobre la duración del adelantamiento (Tabla 24). Estos parámetros estaban relacionados con el tramo de carretera: el ancho de carril y arcén, el límite de velocidad y la IMD.

En cuanto a los parámetros relacionados con el grupo de ciclistas, el número de ciclistas en el grupo tuvo un efecto claro en la duración del adelantamiento de tal manera que grupos formados por un mayor número de ciclistas generaron una mayor duración del adelantamiento.

La configuración en la que circuló el grupo de ciclistas tuvo un efecto débil en la duración del adelantamiento. La alineación horizontal donde se realizó el adelantamiento no tuvo relación con la duración del adelantamiento para las maniobras en seguimiento. La presencia de un vehículo en sentido contrario durante la maniobra tuvo un claro efecto en la duración del adelantamiento, presentando valores más bajos de duración del adelantamiento cuando se veía un vehículo que se aproximaba.

Por último, la velocidad del vehículo adelantante y la separación lateral afectaron a la duración del adelantamiento de tal manera que las velocidades de adelantamiento más elevadas y las separaciones laterales menores fueron asociadas con una reducción en la duración del adelantamiento.

5.2 Análisis de la funcionalidad del tráfico

El principal objetivo de esta tesis es analizar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas. Este análisis se ha desarrollado, por una parte, a partir de las observaciones realizadas en campo, y, por otra parte, mediante el uso de un modelo de microsimulación del tráfico.

5.2.1 Análisis de la funcionalidad del tráfico a partir de observaciones

Para analizar la funcionalidad del tráfico considerando todos los usuarios que circulan por la vía, se ha desarrollado una metodología de observación directa del fenómeno, necesaria para entender el comportamiento de estos usuarios y obtener datos que permitan caracterizar la funcionalidad. Esta metodología consiste en grabaciones naturalísticas realizadas simultáneamente en los extremos del tramo de estudio. Los resultados de estas tomas de datos se utilizaron también para obtener diferentes escenarios de tráfico necesarios para calibrar y validar el modelo de microsimulación del tráfico a partir de datos reales.

Los tramos de carretera estudiados corresponden a la CV-502 y a la CV-310, son dos tramos con una elevada presencia de ciclistas comprobada mediante varias jornadas de aforos. El tramo de la CV-502 tiene una longitud de 2180 m, un ancho de carril de 3.5 m y no dispone de arcén, siendo una carretera estrecha donde los ciclistas se ven obligados a circular por el carril. El tramo de la CV-310 tiene una longitud de 4900 m, un ancho de carril de 3.2 m y un ancho de arcén de 1.5 m coloreado de rojo.

Por tanto, el estudio se ha llevado a cabo en dos tramos con características geométricas y de tráfico diferentes, con el fin de que los resultados ofrezcan conclusiones teniendo en cuenta esta variabilidad.

5.2.1.1 Tramo de estudio en la CV-502

Como se ha descrito en el apartado 4.2.2.1 de la metodología, este tramo de estudio está situado en el sur de València, en la carretera CV-502, entre los PK1+315 y PK3+500.

Se tomaron datos a la entrada y salida del tramo un día laborable por la mañana, iniciando a las 9:10 y con una duración de unas 3 horas. Los datos se redujeron y analizaron en los dos sentidos de circulación. En el sentido decreciente se registraron un total de 166 ciclistas y 263 vehículos ligeros, mientras que en el creciente se registraron 93 ciclistas y 319 vehículos ligeros como se puede observar en las Figura 67 y Figura 68.

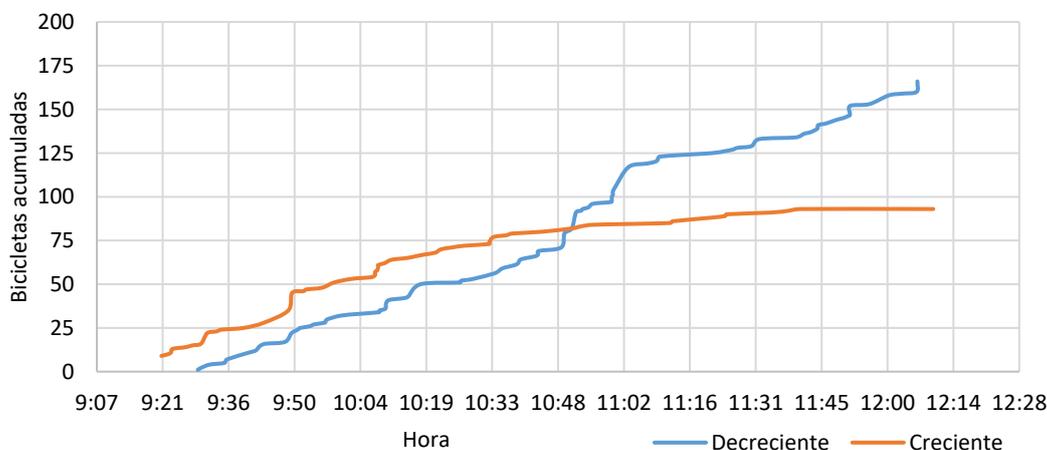


Figura 67. Bicicletas acumuladas registradas durante la toma de datos en la CV-502.

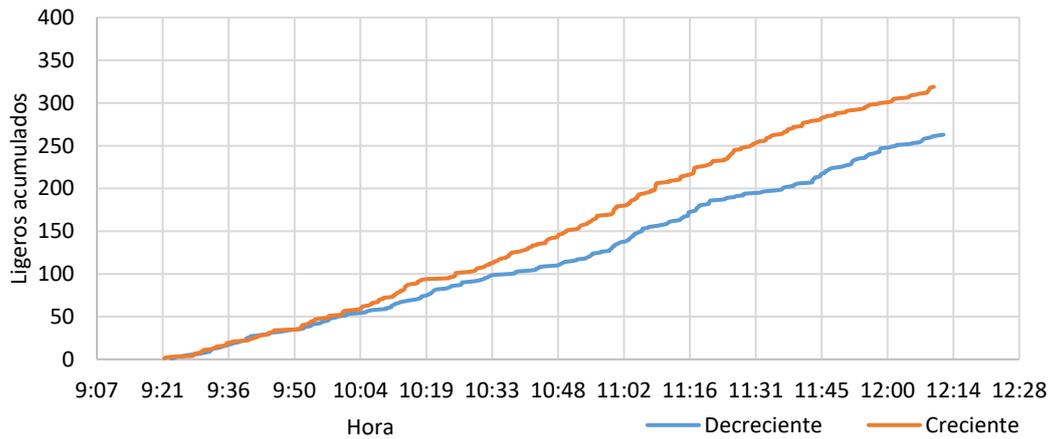


Figura 68. Vehículos motorizados acumulados registrados durante la toma de datos en la CV-502.

A partir de los datos registrados de tiempos de entrada y salida del tramo agrupados cada 15 minutos, se calcularon las intensidades horarias equivalentes utilizando el método de la ventana deslizante cada 5 minutos.

La Figura 69 y la Figura 70 muestran las intensidades horarias de ciclistas observados en los dos sentidos de circulación. Estos gráficos presentan las variaciones de demanda ciclista en el tramo durante el periodo de toma de datos. Se observa como generalmente los ciclistas recorren el tramo a primera hora de la mañana en sentido creciente, y realizan el recorrido de vuelta más tarde en el sentido decreciente. También se observa que el sentido decreciente es el que mayor demanda ciclista soporta.

Por otra parte, estas intensidades horarias proporcionan los escenarios de tráfico necesarios para calibrar y validar el modelo de microsimulación del tráfico para este tramo de carretera.

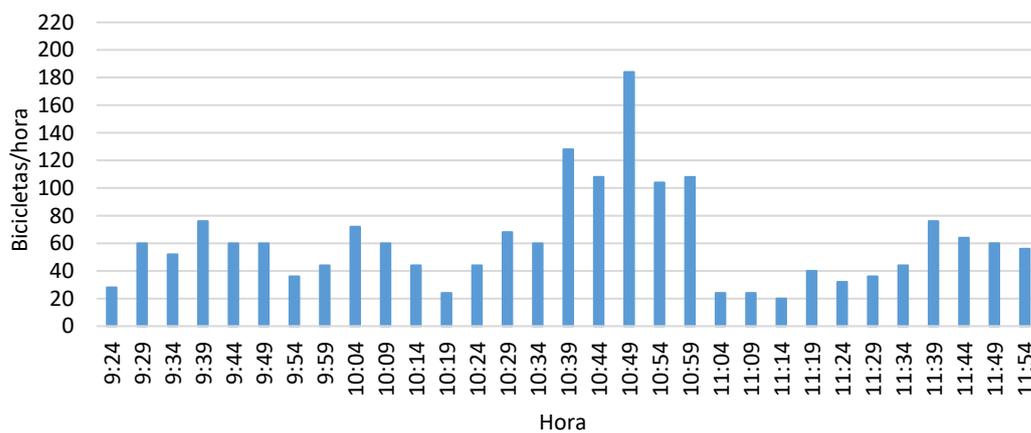


Figura 69. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido decreciente en la CV-502.

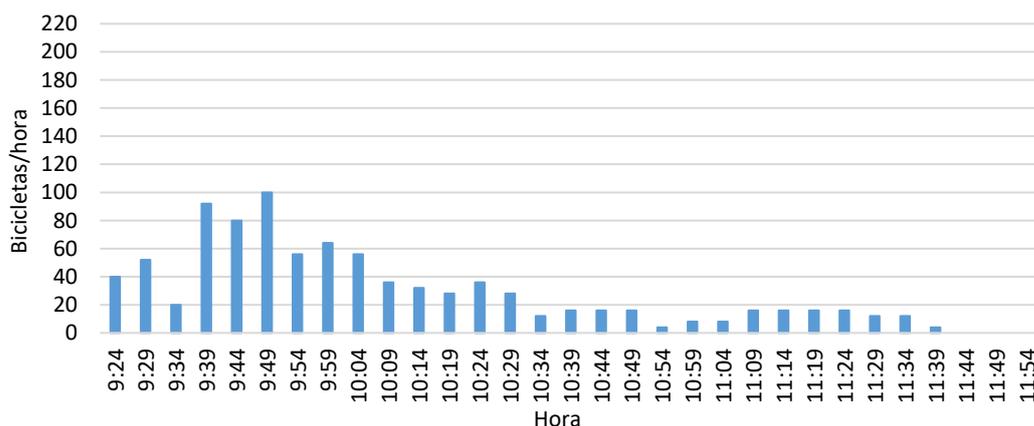


Figura 70. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido creciente en la CV-502.

Las Figura 71 muestra las intensidades horarias equivalentes de vehículos motorizados calculadas a partir de los datos observados en los dos sentidos de circulación. Se observa una intensidad horaria de vehículos motorizados ligeramente mayor en sentido creciente, mientras que en el sentido decreciente se aprecian diferentes picos de intensidades a lo largo de la mañana.

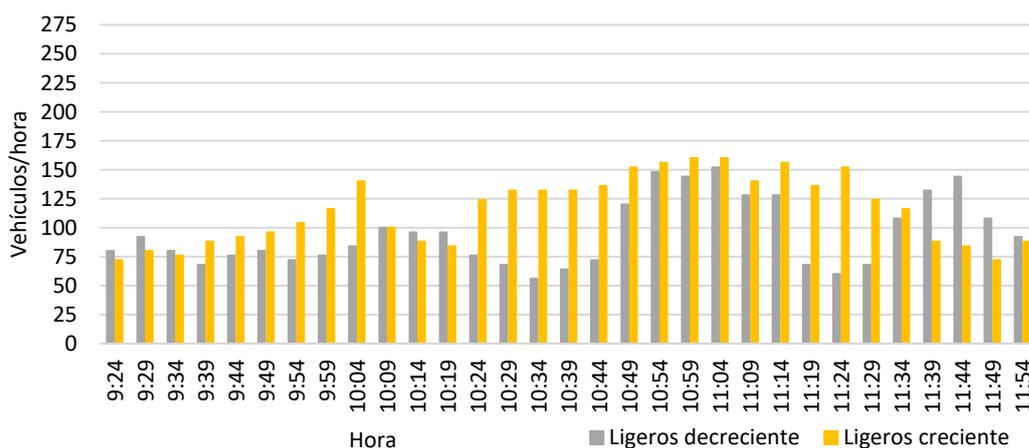


Figura 71. Intensidad horaria equivalente de motorizados en sentido decreciente en la CV-502.

Respecto al número de grupos ciclistas y al número de ciclistas que componen cada grupo en la Figura 72 se muestra esta información. Los grupos registrados en este tramo circularon en paralelo, exceptuando un grupo de tres ciclistas y otro de cinco que lo hicieron en línea.

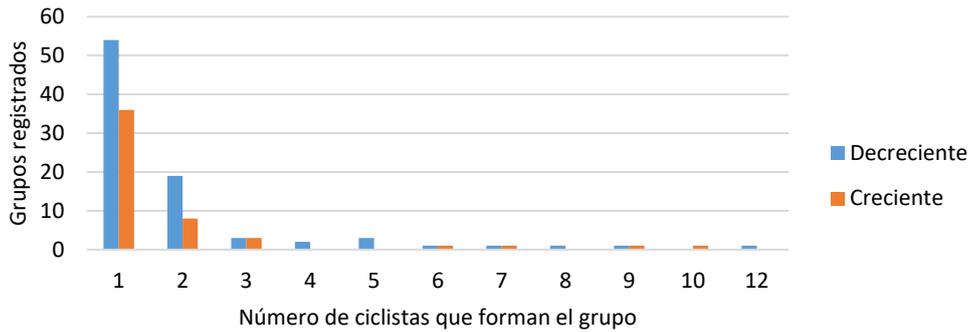


Figura 72. Grupos de ciclistas y número de ciclistas que forman el grupo registrados en la CV-502.

Los datos de velocidades medias de recorrido de cada usuario se muestran en la Figura 73. Estos datos corresponden al sentido decreciente de recorrido del tramo, ya que es el sentido en el que se ha observado un mayor número de ciclistas. Sin embargo, en este tramo de carretera las velocidades en los dos sentidos de circulación no presentan diferencias estadísticamente significativas, ya que la pendiente del tramo es prácticamente nula.

Se ha realizado una prueba ANOVA para comparar las medias de las velocidades medias de recorrido de los ciclistas individuales y de los grupos, obteniendo que no existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. Por tanto, la velocidad media de recorrido de todos los ciclistas registrados fue de 29.52 km/h con una desviación de 4.47 km/h. Los vehículos motorizados ligeros circularon a una velocidad media de 62.08 km/h con una desviación de 8.24 km/h.

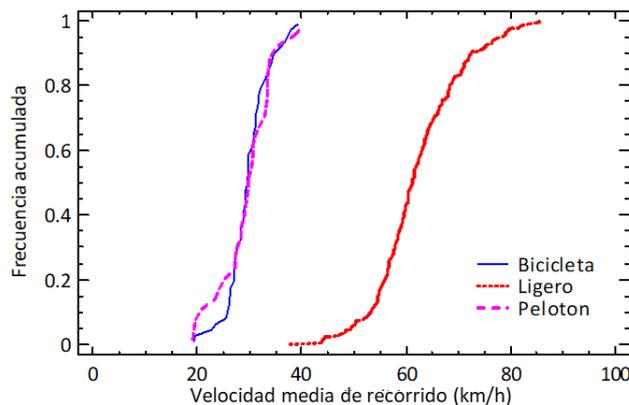


Figura 73. Velocidades medias de recorrido de los usuarios en sentido decreciente en la CV-502.

Para determinar cómo afecta a la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos motorizados el hecho de encontrarse a bicicletas en el tramo, y tener que adelantarlas, se ha representado el valor de la velocidad media de recorrido del tramo en función del número de ciclistas que ha adelantado cada vehículo en la Figura 74. Se observa una tendencia decreciente en la velocidad media de recorrido a medida que se adelanta a más ciclistas. La línea de tendencia calculada presenta una pendiente negativa, indicando que la velocidad media de recorrido decrece ligeramente al adelantar a un mayor número de bicicletas.

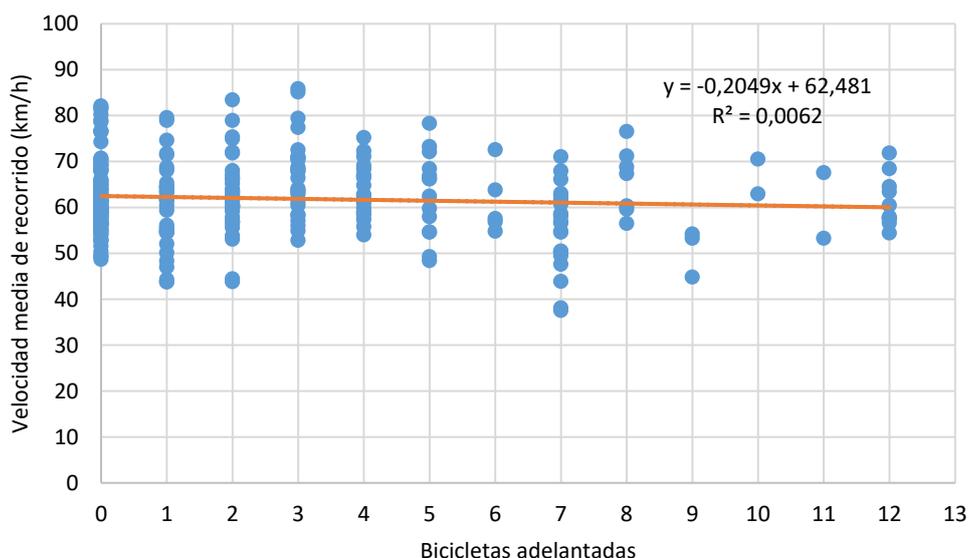


Figura 74. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de bicicletas adelantadas en la CV-502.

En la Figura 75 se muestra la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos motorizados según el número de grupos de ciclistas que ha adelantado cada uno de ellos, considerándose también los ciclistas individuales. Se observa la misma relación que en la Figura 74, a mayor número de grupos de ciclistas adelantados la velocidad media de recorrido de los motorizados decrece. Sin embargo, al representar a los ciclistas en grupos la pendiente de la línea de tendencia es ligeramente mayor que al considerar a los ciclistas separados. Esto indica que los grupos de ciclistas representan un mayor obstáculo para la circulación normal de los vehículos motorizados que las bicicletas circulando individualmente.

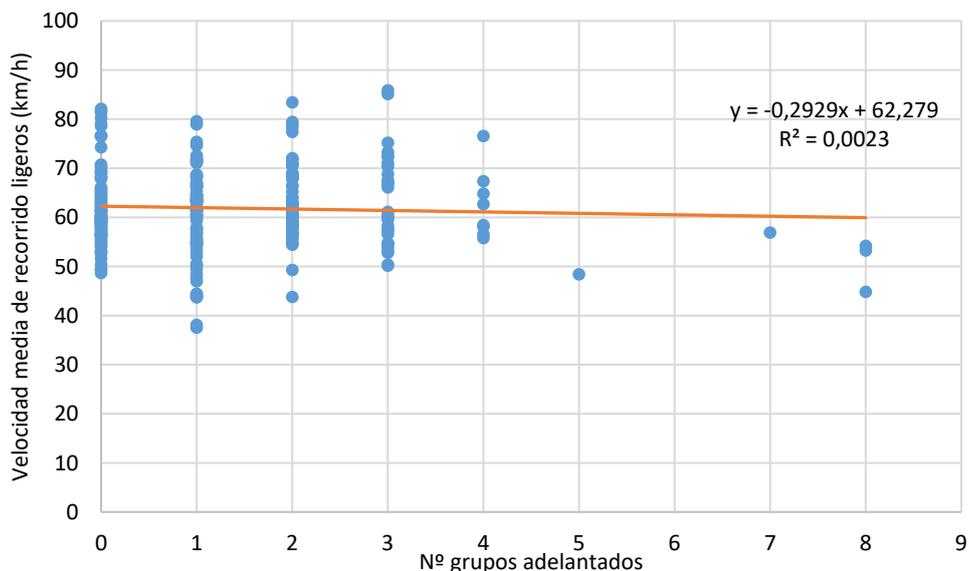


Figura 75. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de grupos de bicicletas adelantados en la CV-502.

5.2.1.2 Tramo de estudio en la CV-310

La Carretera CV-310 tiene un elevado tráfico ciclista, ya que enlaza con la subida al Oronet y al Garbí, que son dos puertos de montaña habituales en las rutas ciclistas. La zona de estudio se encuentra entre el PK 9+550, donde hay una intersección con la CV-333, y el PK 14+450, donde hay una glorieta tal y como de ha descrito en el capítulo correspondiente de la metodología.

Se dispuso de un punto de control en cada uno de los extremos del tramo, y en ellos se registró para cada usuario su tipología y su tiempo de paso.

A partir de los tiempos de paso de cada usuario en la entrada y salida del tramo de estudio, se determinaron el porcentaje de vehículos en cola al inicio y fin de cada tramo, las velocidades medias de recorrido de cada usuario y el número de adelantamientos que se han producido. También se obtuvieron datos de volumen de tráfico, composición y reparto.

Se registraron 287 bicicletas en sentido decreciente y 191 en sentido creciente. En la Figura 76 se muestran las bicicletas acumuladas registradas durante la toma de datos. Se observa como el tramo de estudio pertenece a una ruta cíclica, en la que los ciclistas lo recorren en sentido creciente a primera hora y más tarde lo vuelven a recorrer en sentido contrario.

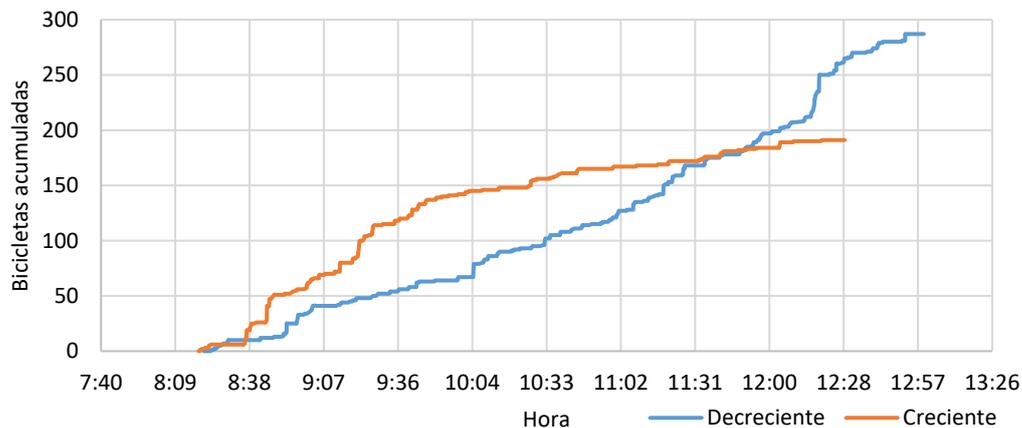


Figura 76. Bicicletas acumuladas durante la toma de datos en los dos sentidos en la CV-310.

En cuanto a los vehículos motorizados, durante el periodo de estudio se registraron 846 vehículos motorizados en sentido decreciente y 595 en sentido creciente. En sentido decreciente se registraron un 1% de vehículos pesados, y en sentido creciente un 2%. El porcentaje de motocicletas en ambos sentidos fue del 7%. Los vehículos ligeros registrados en sentido decreciente fueron 777, y en sentido creciente 539 (Figura 77).

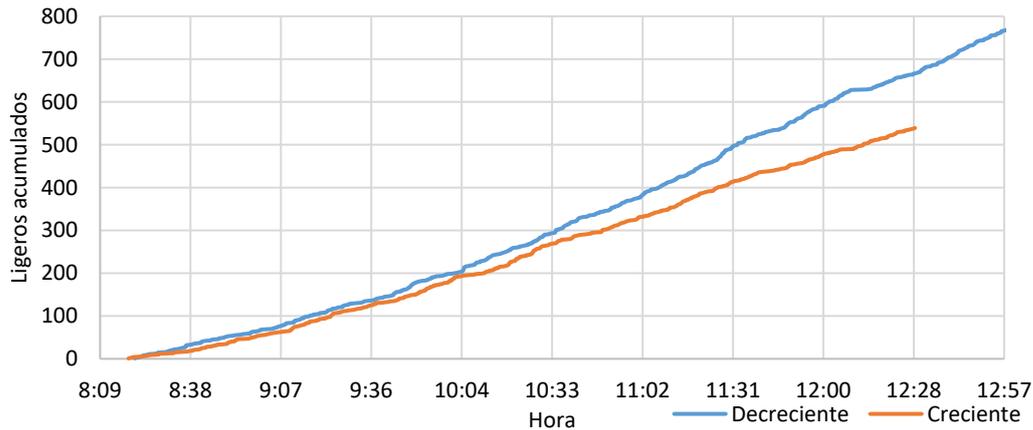


Figura 77. Vehículos ligeros acumulados en los dos sentidos en la CV-310.

A partir de la base de datos a nivel macroscópico se obtuvieron las intensidades de bicicletas en intervalos de 15 minutos y la intensidad horaria equivalente utilizando el método de la ventana deslizante cada 5 minutos. Los 15 minutos más cargados en el sentido decreciente corresponden al intervalo de 12:15 a 12:30 de la mañana, este pico corresponde con la bajada de los ciclistas desde el Oronet en su ruta de regreso a casa (Figura 78).

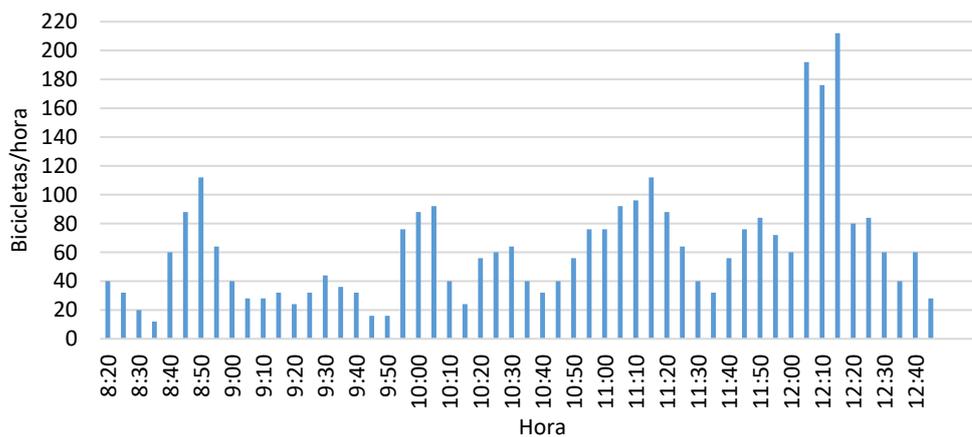


Figura 78. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido decreciente en la CV-310.

En sentido creciente se registraron más bicicletas a primera hora de la mañana cuando subían hacia el Oronet (Figura 79). En este sentido se registraron menos ciclistas que en el opuesto, ya que muchos de ellos realizaron el recorrido de subida a este puerto de montaña por una carretera paralela, la CV-333, realizando el recorrido de vuelta por este tramo de estudio.

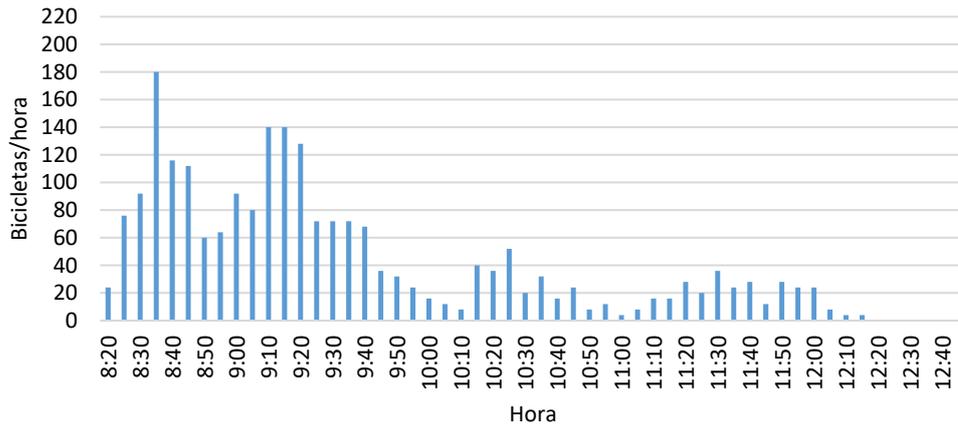


Figura 79. Intensidad horaria equivalente de bicicletas en sentido creciente en la CV-310.

Las intensidades horarias equivalentes de vehículos ligeros se calcularon a partir de las observaciones. En el sentido decreciente se registraron intensidades mayores que en el sentido creciente, como se muestra en la Figura 80.

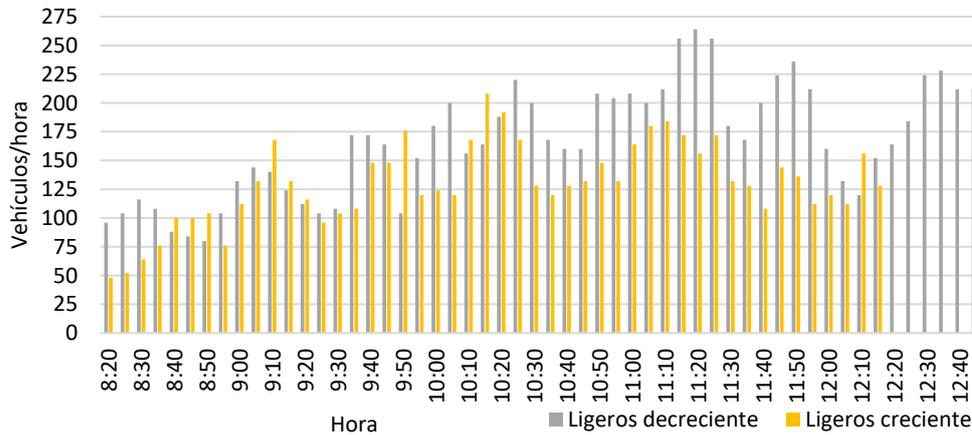


Figura 80. Intensidades horarias equivalentes vehículos ligeros en los dos sentidos en la CV-310.

También se analizó cómo circulan los ciclistas por el tramo de carretera estudiado. Los ciclistas observados recorrieron el tramo en solitario o en grupos formados por un número diferente de ciclistas circulando en línea o en paralelo. En la Figura 81 se muestra el número de grupos de ciclistas observados según el número de ciclistas que los forman. La mayoría fueron ciclistas individuales y parejas.



Figura 81. Grupos de ciclistas y número de ciclistas que forman el grupo registrados en la CV-310.

En cuanto a las configuraciones, en línea o paralelo, en las que circularon estos grupos de ciclistas por el tramo de estudio, se registraron estas configuraciones en la entrada y en la salida del tramo en el sentido decreciente. De los 63 grupos de ciclistas observados, 36 circulaban en línea (57%), mientras que 27 (43%) lo hacían en paralelo. En la Figura 82 se puede ver el porcentaje de grupos que circulan en línea y paralelo según el tamaño del grupo. En general los grupos más grandes circularon en paralelo.

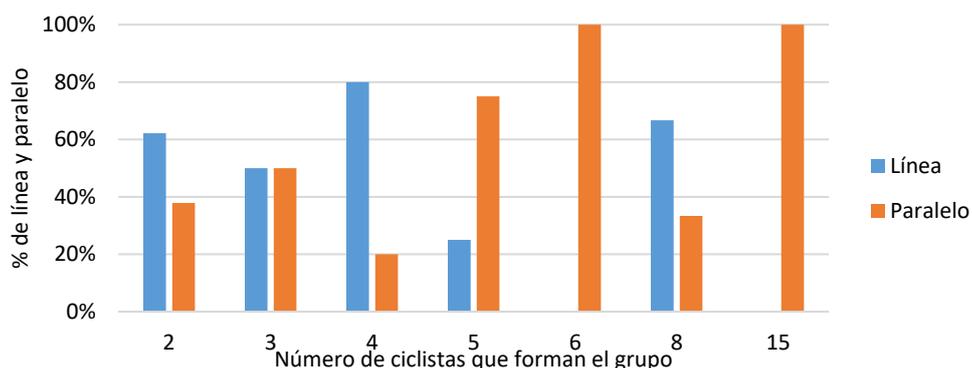


Figura 82. Porcentaje de configuración en línea o paralelo en sentido decreciente en la CV-310.

El tramo de estudio tiene una ligera pendiente que no afecta a la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados, pero sí a la velocidad media de recorrido de las bicicletas, ya que estas son más sensibles a la pendiente.

La Figura 83 muestra las distribuciones de las velocidades medias de recorrido del tramo de los ciclistas en los dos sentidos de circulación. La velocidad media de recorrido de las bicicletas en sentido decreciente fue de 34.85 km/h con una desviación de 4.79 km/h. En sentido creciente esta velocidad media de recorrido fue de 22.64 km/h, con una desviación de 3.42 km/h.

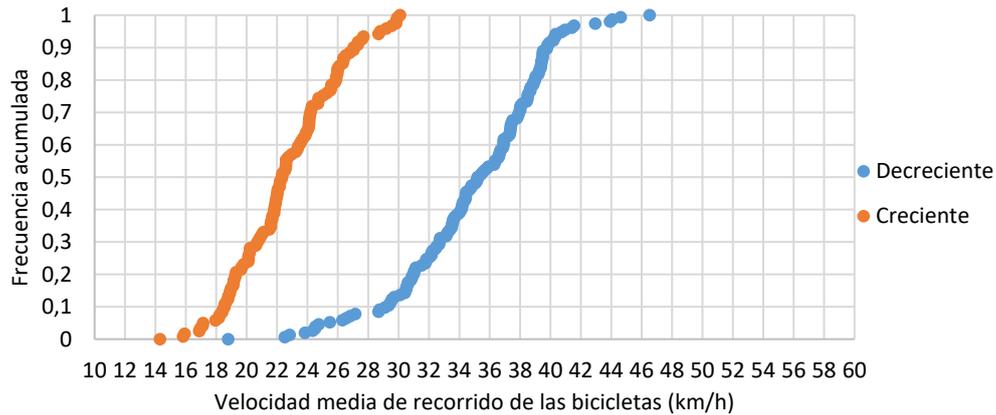


Figura 83. Distribución de velocidades de las bicicletas en los dos sentidos en la CV-310.

En cuanto a los vehículos motorizados, se registraron 777 en sentido decreciente con una velocidad media de recorrido de 69.93 km/h y una desviación de 6.78 km/h. En el sentido opuesto se registraron un total de 538 vehículos ligeros circulando a una velocidad media de recorrido de 68.51 km/h y con una desviación de 6.75 km/h.

A partir de todos los datos observados en el tramo y de los datos calculados se ha analizado la variación de la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados ligeros según el número de bicicletas que han adelantado. En la Figura 84 se muestra como la línea de tendencia es decreciente indicando que la velocidad media de recorrido de los motorizados disminuye a medida que adelantan a más bicicletas en el tramo. Esta tendencia decreciente es más pronunciada para los vehículos a motor que han adelantado a más de 15 bicicletas, siendo para pocas bicicletas adelantadas no apreciable la reducción de la velocidad media de recorrido.

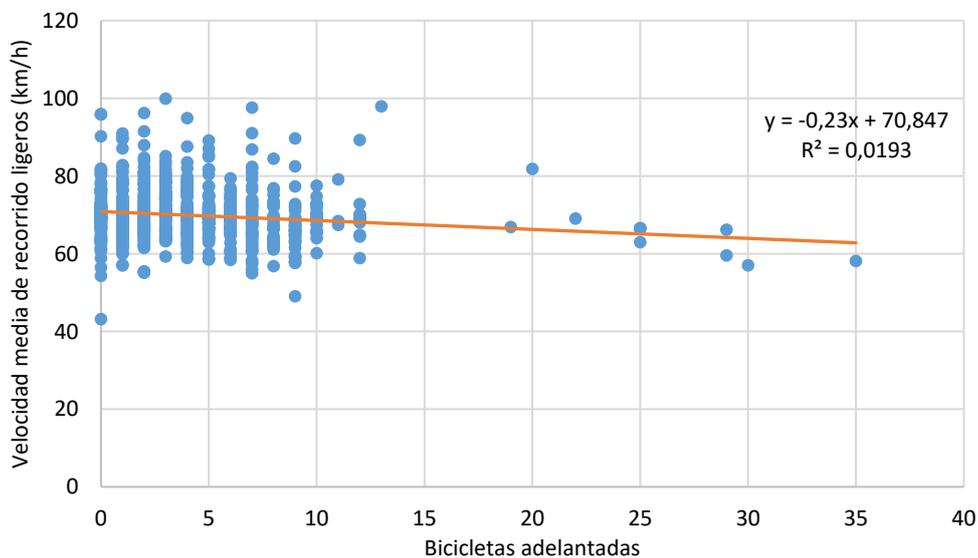


Figura 84. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de bicicletas adelantadas en la CV-310.

También se ha calculado la variación de la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos motorizados según los grupos de ciclistas adelantados, considerándose también los ciclistas individuales (Figura 85). En este gráfico se observa la misma tendencia que en la Figura 84, a medida que se adelantan más grupos de ciclistas la velocidad media de recorrido de los

motorizados disminuye. Al considerar a los grupos la pendiente de la línea de tendencia es ligeramente mayor, indicando que el adelantar a grupos de ciclistas afecta más a la velocidad media de recorrido que adelantar a ciclistas individuales.

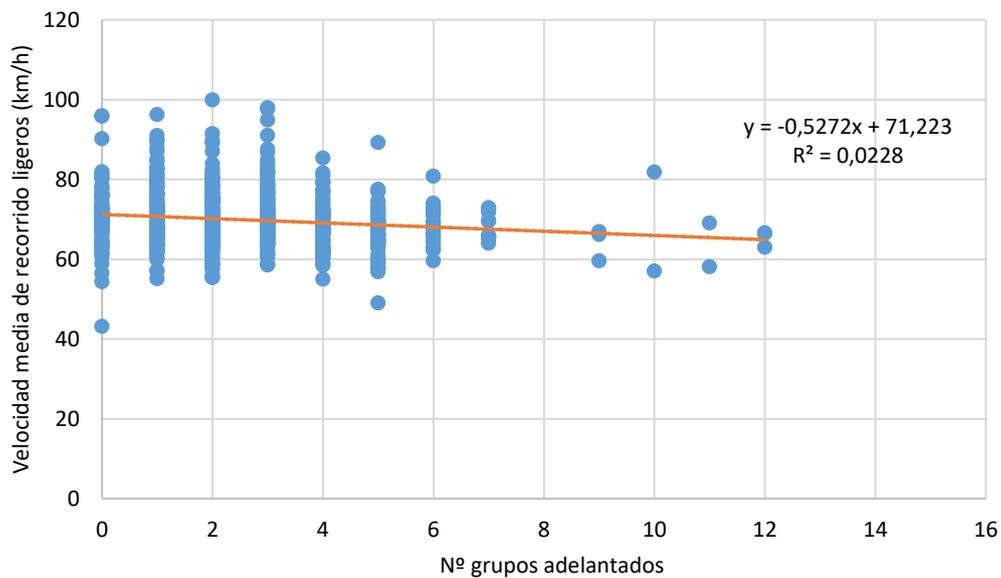


Figura 85. Velocidad media de recorrido (km/h) de los motorizados según el número de grupos de bicicletas adelantados en la CV-310.

5.2.1.3 Resumen de las tomas de datos en los extremos del tramo de estudio

A partir de las tomas de datos en inicio y fin de tramo se obtuvieron las velocidades medias de recorrido de cada vehículo motorizado y de cada bicicleta, y se determinó como afecta a las velocidades medias de recorrido del tramo de los vehículos a motor el hecho de adelantar a ciclistas. Los resultados apuntaron a una reducción en la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros a medida que adelantaron a un mayor número de ciclistas.

Sin embargo, con estos datos no se puede medir la posible demora que se genera en los vehículos a motor cuando alcanzan a las bicicletas, esta demora supone una variación en la velocidad puntual de los vehículos motorizados y resulta en una afección a la funcionalidad de la vía. Sin embargo, esta demora puede afectar muy levemente a la velocidad media de recorrido del tramo, y por tanto no puede identificarse en los datos de velocidades medias de recorrido.

Por otra parte, las tomas de datos en campo ofrecen pocas posibilidades a la hora de analizar la funcionalidad, ya que los escenarios de tráfico observados difícilmente adoptan valores extremos, y por tanto el rango de escenarios de tráfico observado no es muy elevado. Sin embargo, estas observaciones son necesarias para entender el comportamiento de los diferentes usuarios en el tramo, y para recoger datos que permitan calibrar y validar otras herramientas como la microsimulación del tráfico. Además, las medidas de desempeño que se pueden calcular a partir de las observaciones son limitadas. Estas observaciones sirven de base para los modelos de microsimulación del tráfico, mediante los que sí es posible ampliar el número de medidas de desempeño calculadas.

5.2.2 Estudio de microsimulación

En esta investigación se ha adaptado un modelo de microsimulación del tráfico, con el objetivo de poder simular adelantamientos a ciclistas en carreteras convencionales, así como su interacción con los vehículos motorizados. Esta adaptación se ha llevado a cabo gracias a la colaboración del equipo de Aimsun Next. Las principales modificaciones que se han realizado han consistido en:

- Incorporación de un parámetro que permite adelantar a vehículos lentos incluso en línea continua. Esta mejora en el modelo permite simular el comportamiento real de los conductores al adelantar a ciclistas en línea continua, dado que el Reglamento General de Circulación lo permite siempre que exista suficiente visibilidad. Cuando exista línea continua los vehículos motorizados podrán adelantar a ciclistas, pero no a otros motorizados. Para simular este comportamiento correctamente se ha introducido un nuevo parámetro en el modelo de adelantamiento en carretera que permite a un usuario de la vía adelantar a otro en línea continua cuando la diferencia entre sus velocidades deseadas sea mayor de un cierto umbral, permitiendo así la discretización de los usuarios adelantados.
- Consideración de los grupos de ciclistas como un solo vehículo. Se ha comprobado, a partir de observaciones, que los pelotones circulan manteniendo su posición durante el recorrido de tramos de carretera convencional sin pendiente. Por ello, para simular grupos ciclistas de diferente tamaño se ha considerado con una longitud equivalente calibrada a partir de las duraciones observadas para cada tramo de carretera.
- Calibración de la longitud efectiva de cada tipo de agrupación de ciclistas analizado. Esta longitud se calibró con el fin de simular los adelantamientos realizados con invasiones parciales del carril opuesto, ajustando las duraciones observadas en campo con las resultantes de las simulaciones, ya que en el microsimulador para realizar un adelantamiento se debe de cambiar totalmente de carril y posteriormente regresar al carril propio.
- Modificación del comportamiento de los vehículos permitiendo realizar adelantamientos con menores duraciones para adaptarse a las observaciones. Se incluyó una modificación, particularmente para este estudio, que permite realizar un adelantamiento en dos pasos de simulación a usuarios que dispongan de un ancho menor a la mitad del carril. De esta manera solamente se permite este comportamiento cuando se adelanta a ciclistas, asegurando también un comportamiento correcto cuando se adelantan los vehículos motorizados entre ellos.

Una vez adaptado el modelo al comportamiento de los ciclistas y a su interacción con los motorizados se procedió a la calibración y validación del modelo mediante el uso de datos observados.

En esta investigación se han modelado, calibrado y validado dos tramos de carretera convencional en la que la presencia de ciclistas es muy común. Los resultados obtenidos en estos dos tramos, a partir de observaciones y del uso de los modelos debidamente calibrados y validados, permitieron caracterizar el efecto de la presencia de ciclistas sobre la funcionalidad del tráfico en carretera, teniendo en cuenta factores relacionados con el grupo de ciclistas, con la carretera y con la propia maniobra de adelantamiento.

Los dos tramos seleccionados para ser modelados en Aimsun Next están situados en la CV-502 y en la CV-310. Estos dos tramos de carretera disponen de características geométricas y de

tráfico diferentes, de esta manera, los resultados obtenidos en cada uno de ellos se relacionaron con sus características particulares, permitiendo caracterizar el efecto de la presencia del tráfico ciclista en la funcionalidad del tráfico.

5.2.2.1 Tramo de la carretera CV-502

En este apartado se presentan los resultados necesarios para modelizar el tramo de estudio situado en la CV-502. Estos resultados se corresponden con las características geométricas del tramo de carretera y con las observaciones del tráfico tanto a nivel microscópico como macroscópico. También se muestran los resultados de los procesos de calibración y validación del modelo de microsimulación.

5.2.2.1.1 Características geométricas del tramo de estudio

Para modelar el tramo en el microsimulador de tráfico Aimsun Next es necesario definir algunas características geométricas específicas que han sido observadas mediante mediciones en el propio tramo o mediante el uso de programas informáticos que permiten obtener esta información. A partir de estas observaciones se han determinado las zonas con línea central de la calzada continua y discontinua, las velocidades límite específicas, los anchos de carril y de arcén y la longitud del tramo, todo ello en los dos sentidos de circulación (Tabla 26 y Tabla 27).

La longitud total del tramo es de 2,185 metros, siendo el ancho de los carriles de 3.5 metros. La pendiente es prácticamente nula en todo el tramo.

Sentido decreciente				Sentido creciente			
Inicio	Fin	Longitud	Límite velocidad	Inicio	Fin	Longitud	Límite velocidad
0	1623	1623	70	0	120	120	40
1623	2118	395	60	120	496	376	60
2118	2185	167	40	496	2185	1689	70

Tabla 26. Límites de velocidad en el tramo de la CV-502.

Sentido decreciente				Sentido creciente			
Inicio	Fin	Longitud	Línea	Inicio	Fin	Longitud	Línea
0	164	164	continua	0	268	268	continua
164	521	357	discontinua	268	722	454	discontinua
521	642	121	continua	722	929	207	continua
642	1062	420	discontinua	929	1312	383	discontinua
1062	1220	158	continua	1312	1492	180	continua
1220	1760	540	discontinua	1492	2011	519	discontinua
1760	2185	425	continua	2011	2185	174	continua

Tabla 27. Líneas centrales de separación de sentidos existentes en el tramo de la CV-502.

5.2.2.1.2 Resultados de las tomas de datos a nivel microscópico

Los datos a nivel microscópico o de comportamiento de los usuarios durante la maniobra de adelantamiento han sido recogidos mediante los recorridos de las bicicletas instrumentadas por el tramo de estudio. El tramo fue recorrido por los grupos de ciclistas circulando en las siete configuraciones descritas anteriormente. Las principales variables utilizadas para modelizar el comportamiento durante el adelantamiento son la velocidad del vehículo adelantante durante la maniobra, la separación lateral entre bicicleta y vehículo motorizado y la duración del adelantamiento.

Del total de adelantamientos registrados en el tramo el 1% fue realizado por motocicletas, y el 4% por vehículos pesados. El 96% restante fueron adelantamientos realizados por vehículos motorizados ligeros, y son los que se van a utilizar para realizar el estudio. En la Tabla 28 se muestran las 225 maniobras registradas por vehículos ligeros según la configuración del grupo de ciclistas adelantado.

El 21% de estas 225 maniobras de adelantamiento se realizaron desde un seguimiento previo de los ciclistas, siendo el porcentaje más elevado de todos los tramos de carretera analizados. Un 8% de los adelantamientos se realizaron en cola de otro vehículo precedente, mientras que el 70% restante fueron maniobras lanzadas.

En este tramo de carretera solamente en un 14% de los adelantamientos registrados no se invadió el carril opuesto al adelantar a los diferentes grupos de ciclistas. En el 55% de los adelantamientos la invasión fue parcial, mientras que en un 44% se invadió totalmente el carril opuesto para realizar el adelantamiento.

Por tanto, en este tramo con sección transversal desfavorable se ha registrado un porcentaje de seguimiento a los ciclistas elevado, y una invasión del sentido opuesto durante el adelantamiento en prácticamente la totalidad de los casos.

En la Tabla 28 se recogen los datos registrados de velocidades del vehículo adelantante, separaciones laterales y duraciones del adelantamiento a los distintos grupos de ciclistas en el tramo de la carretera CV-502.

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 28. Número de adelantamientos registrados y datos de velocidad del adelantante, separación lateral y duración del adelantamiento según configuración del grupo de ciclistas adelantado.

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 si se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las medias para cada configuración de ciclistas adelantada con un nivel de significancia del 5; cuando los ciclistas circularon en línea se registraron separaciones mayores, y en todos los casos, las separaciones laterales medias respetaron la distancia mínima exigida de 1.5 metros. Las duraciones de los adelantamientos también presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias para los diferentes grupos de ciclistas adelantados, las 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.

5.2.2.1.3 Resultados de las tomas de datos a nivel macroscópico

Se tomaron datos a la entrada y salida del tramo un día laborable por la mañana, iniciando a las 9:15 y con una duración poco mayor de 3 horas. Los datos se redujeron y analizaron en los dos sentidos de circulación. 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. Se obtuvieron los escenarios de tráfico horario equivalente, a partir de las observaciones cada 15 minutos (Figura 86) 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.

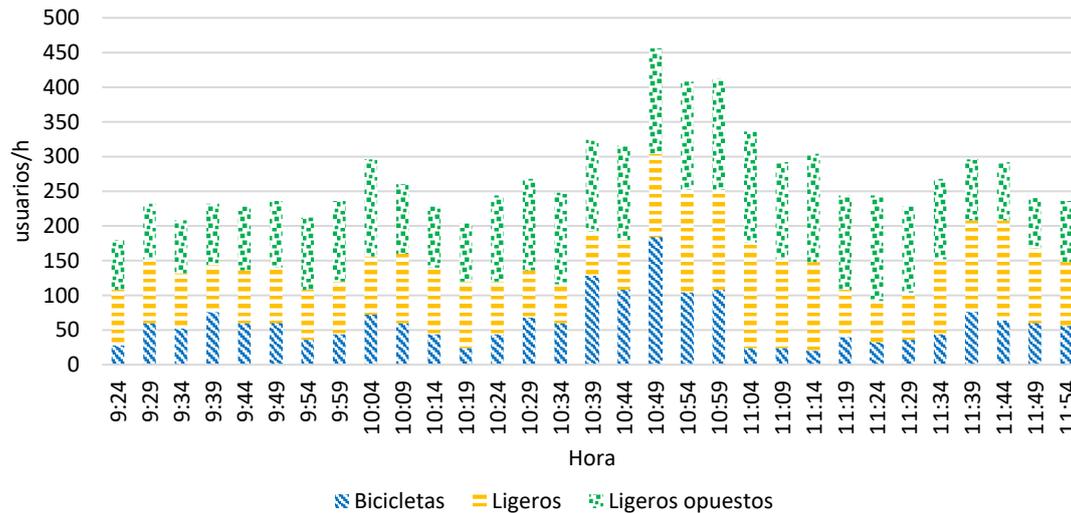


Figura 86. Intensidades horarias equivalentes de usuarios en sentido decreciente calculadas para la CV-502.

A partir de los datos observados en inicio y fin del tramo se obtuvieron las distribuciones de velocidades medias de recorrido de las bicicletas y los vehículos ligeros. Estos datos de velocidades son necesarios para definir las velocidades de los usuarios en Aimsun, y para calibrar y validar los resultados de las simulaciones.

Los datos de velocidades de bicicletas circulando individualmente y en pelotón se compararon mediante un análisis ANOVA y los resultados indicaron que no existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las velocidades medias de recorrido de estos dos grupos ($F=0.09$, $p\text{-valor}=0.7591$). Por tanto, a la hora de analizar las velocidades medias de recorrido de ciclistas individuales y en grupo, se consideran todos los datos conjuntamente, ya que todos ellos circulan a velocidad similar. La distribución de velocidades medias de recorrido de los ciclistas presentó un valor promedio de 29.52 km/h y una desviación de 4.45 km/h. Las velocidades de los ciclistas presentaron poca dispersión debido a que el tramo no presenta prácticamente pendiente, y los ciclistas observados eran semiprofesionales con una forma física desarrollada.

Los 263 vehículos ligeros que se registraron circulando en el sentido de estudio presentaron una velocidad media de recorrido con un valor promedio de 62.08 km/h y una desviación de 8.21 km/h.

Posteriormente, se seleccionaron los escenarios para calibrar el modelo en Aimsun Next y para validarlo a partir de los datos de intensidades horarias observadas (Figura 86). 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 29). 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 29). 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 ciclistas	20	100	192	136	32	72	52

Tabla 29. Escenarios de tráfico (usuarios/h) utilizados para la calibración y la validación del tramo de la CV-502.

En la elección de los escenarios de calibración se intentó que las intensidades de ligeros fuesen similares en los tres escenarios, para así analizar el efecto de la variación en la demanda ciclista sin tener en cuenta una excesiva variación en el nivel de tráfico motorizado.

5.2.2.1.4 Calibración del modelo de microsimulación del tráfico

Se realizaron varios procesos de calibración del modelo, variando en cada uno de ellos los parámetros necesarios. En la Tabla 30 se muestran los resultados de los principales parámetros después del proceso de calibración. En el proceso de calibración del modelo se han utilizado tres escenarios de tráfico que corresponden con las demandas máxima, media y mínima de bicicletas observadas en el tramo, denominados Calmin, Calmed y Calmax respectivamente y mostrados en la Tabla 29.

Durante el proceso de calibración los parámetros específicos calibrados han sido:

- Parámetros específicos de las velocidades deseadas de cada uno de los 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 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.

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

El proceso de calibración se inició analizando los datos a nivel microscópico obtenidos de las maniobras de adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas en el simulador. En esta fase se calibraron las longitudes equivalentes de cada grupo de ciclistas mostradas en la Tabla 30, de manera que no existieran diferencias estadísticamente significativas entre las duraciones de los adelantamientos obtenidas en las simulaciones de los escenarios de calibración y las observadas en campo.

Primero se compararon los valores de duraciones observados con los obtenidos particularmente en cada escenario de calibración, considerando cada configuración del grupo de ciclistas. Los resultados de la prueba ANOVA mostrados en la Tabla 31 muestran que para todos los casos el *p-valor* fue mayor de 0.05, por tanto, las medias de los valores simulados y observados de las duraciones no presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% al comparar los valores observados y los simulados en los tres escenarios de calibración.

Grupos de ciclistas	Observadas			Calmin			Calmed			Calmax			ANOVA	
	N	Media	Desv.	N	Media	Desv.	N	Media	Desv.	N	Media	Desv.	F	p-valor
1	37	5.65	1.65	148	5.88	1.46	192	5.74	1.57	190	5.56	1.54	1.22	0.303
2L	41	6.71	2.11	45	6.89	1.82	35	6.34	1.81	41	6.71	2.11	0.51	0.673
2P	42	6.17	1.99	45	6.18	1.93	81	6.20	1.64	73	6.06	1.55	0.10	0.961
4L	36	8.58	2.22	-	-	-	-	-	-	51	8.31	2.15	0.32	0.571
4P	31	6.84	2.00	-	-	-	-	-	-	40	6.65	1.66	0.19	0.665
10L	16	9.44	2.22	-	-	-	51	9.25	2.29	86	9.30	2.19	0.04	0.960
10P	22	7.59	1.97	-	-	-	69	7.31	1.73	103	7.14	1.62	0.71	0.495

Tabla 31. Resultados estadísticos de las duraciones de los adelantamientos (s) observadas y simuladas para cada escenario de calibración según la configuración del grupo de ciclistas para la CV-502.

Para cada escenario de calibración se comparó una a una las distribuciones de duraciones obtenidas de las simulaciones con las observadas para cada grupo de ciclistas mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S). En total se realizaron 15 pruebas K-S, solamente para un ciclista individual se obtuvieron valores de *p-valor* menores de 0.05, indicando en todos los otros casos que no existía una diferencia estadísticamente significativa entre las dos distribuciones comparadas con un nivel de confianza del 95%.

Los valores de las duraciones del adelantamiento observadas en campo se compararon con las obtenidas en las simulaciones de los tres escenarios de calibración consideradas conjuntamente para cada una de las configuraciones de los grupos de ciclistas analizadas. Se realizaron pruebas de medias, medianas y la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que compara las distribuciones. Los resultados se muestran en la Tabla 32, donde se puede ver que las medias de las duraciones

simuladas y observadas no presentan diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las configuraciones de los grupos de ciclistas consideradas en el estudio.

Las pruebas realizadas considerando las medianas de las duraciones observadas y simuladas tampoco presentaron diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las configuraciones de ciclistas, mientras que los resultados de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov solamente presentaron diferencias estadísticamente significativas para las configuraciones de un ciclista individual, y para los grupos de cuatro ciclistas en línea y cuatro en paralelo.

Grupos de ciclistas	Observados			Simulaciones			Test de medias		Test de medianas		Test de K-S	
	N	Media	Desv.	N	Media	Desv.	t	p-valor	W	p-valor	DN	p-valor
1	37	5.65	1.65	608	5.69	1.54	-0.17	0.868	11307	0.956	0.35	0.0004
2L	41	6.71	2.11	80	6.74	1.96	-0.08	0.938	1636	0.984	0.25	0.060
2P	42	6.17	1.99	199	6.14	1.67	0.09	0.93	4107	0.86	0.22	0.064
4L	36	8.58	2.22	51	8.32	2.14	0.56	0.571	811.5	0.355	0.3	0.042
4P	31	6.84	2.00	40	6.65	1.66	0.43	0.665	602.4	0.84	0.36	0.021
10L	16	9.44	2.22	137	9.28	2.21	0.26	0.79	1055	0.807	0.31	0.138
10P	22	7.59	1.97	172	7.16	1.67	1.11	0.269	1594	0.223	0.33	0.062

Tabla 32. Resultados estadísticos de las duraciones de los adelantamientos (s) observadas y simuladas según la configuración del grupo de ciclistas para la CV-502.

En la segunda parte de la calibración se obtuvieron los valores de los parámetros que minimizaban las diferencias entre los valores observados y simulados de las variables a nivel macroscópico. Se calibraron las velocidades medias de recorrido, los intervalos de tiempo entre usuarios y el porcentaje de vehículos en cola a la entrada y salida del tramo para los tres escenarios.

En la Figura 87 se muestran las distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los vehículos motorizados ligeros observadas en campo y obtenidas de las simulaciones para los tres escenarios de tráfico utilizados en el proceso de calibración para el tramo de la carretera CV-502.

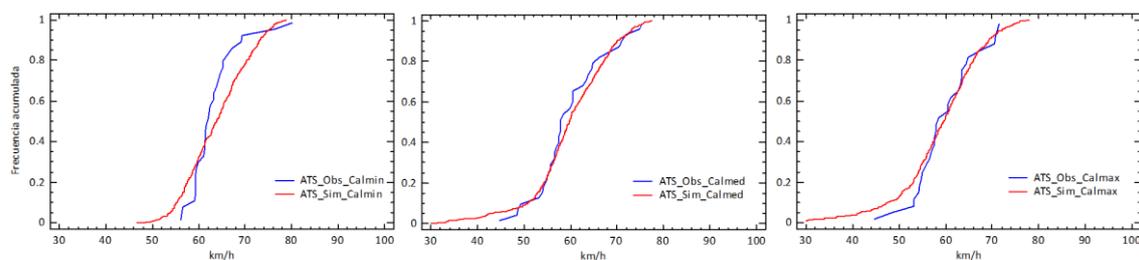


Figura 87. Distribuciones de la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros observada y simulada para los escenarios de calibración en la CV-502.

Estas distribuciones de velocidades medias de recorrido del tramo se compararon estadísticamente mediante pruebas de medias y distribuciones. Los resultados mostrados en la Tabla 33 verifican que las velocidades medias de recorrido de los ligeros simuladas no presentan diferencias estadísticamente significativas con las observadas en cuanto a las comparaciones de medias y distribuciones.

Escenario	Observado		Simulado		K-S test			t test	
	N	Media (km/h)	N	Media (km/h)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor	t	p-valor
Calmin	32	63.05	576	63.95	0.24	1.33	0.059	-0.75	0.454
Calmed	36	59.71	676	59.82	0.13	0.78	0.572	-0.08	0.939
Calmax	30	59.73	536	58.78	0.15	0.79	0.563	0.57	0.568

Tabla 33. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de calibración de la CV-502.

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. En la Figura 88 se representan las distribuciones del intervalo entre usuarios obtenidas en las simulaciones y observadas para los tres escenarios de calibración tanto en la entrada como en la salida del tramo.

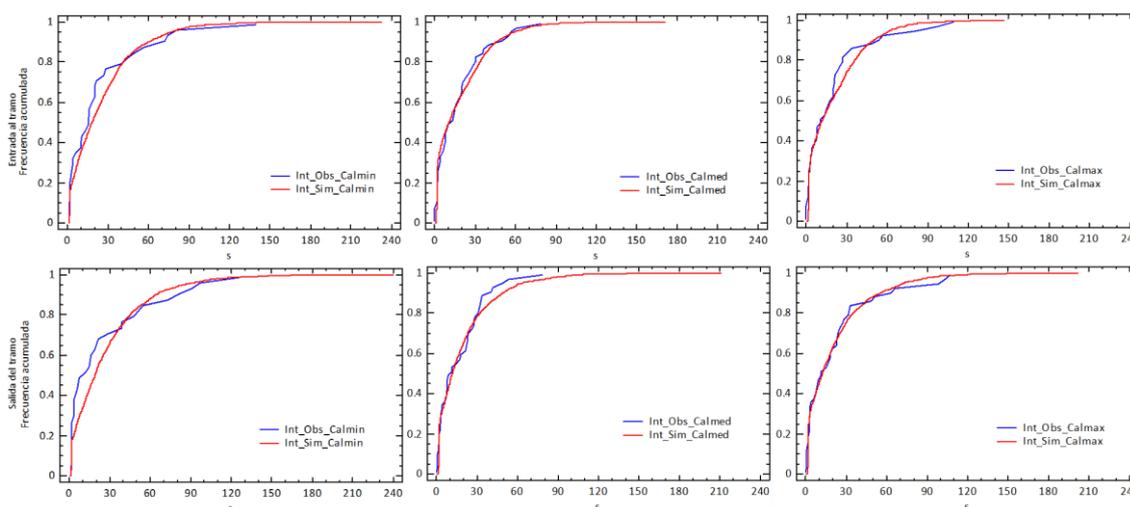


Figura 88. Distribuciones del intervalo de tiempo entre usuarios observado y simulado en la entrada y salida del tramo de estudio para los escenarios de calibración en la CV-502.

Los valores estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios en los extremos del tramo de estudio se muestran en la Tabla 34. Se observa, a partir de los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que las distribuciones de valores del intervalo simulados y los observados no presentan diferencias estadísticamente significativas con un nivel de significancia del 5%.

	Escenario	Observado		Simulado		K-S test		
		N	Media (s)	N	Media (s)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor
Entrada tramo	Calmin	36	23.68	2080	25.45	0.18	1.05	0.223
	Calmed	48	17.47	2892	18.43	0.1	0.72	0.682
	Calmax	46	19.2	2672	19.94	0.13	0.85	0.471
Salida tramo	Calmin	36	25.02	1945	27.34	0.21	1.23	0.098
	Calmed	48	16.81	2731	19.54	0.12	0.82	0.525
	Calmax	46	21.6	2500	21.23	0.15	0.99	0.282

Tabla 34. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de calibración de la CV-502.

El porcentaje de vehículos en cola 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. Para el cálculo de los usuarios en cola se consideraron todos los usuarios de la vía, tanto ciclistas como conductores.

Los resultados se muestran en la Tabla 35, donde se observa que el valor del RMSE para la entrada fue del 2.8% y para la salida del 3.5%, considerando los tres escenarios de calibración. Estos valores se consideran admisibles, ya que representan unas diferencias poco significativas. En la Tabla 35 también se presentan los valores del porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) calculados a partir de las formulaciones descritas en el HCM 2016. El PTSF no tiene en cuenta en su cálculo a las bicicletas, y solamente se calcula con parámetros relativos al tráfico motorizado.

Escenario	Entrada tramo			Salida tramo			PTSF
	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	
Calmin	22.20%	18.80%	3.40%	25.00%	19.10%	5.90%	23.56%
Calmed	29.20%	32.40%	-3.20%	27.10%	28.20%	-1.10%	25.64%
Calmax	30.40%	29.40%	1.00%	28.30%	28.90%	-0.60%	22.55%
RMSE			2.8%			3.5%	

Tabla 35. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de calibración en la entrada y salida del tramo de la CV-502.

A la vista de los resultados del proceso de calibración, se considera que el modelo está calibrado y funciona correctamente, tanto a nivel microscópico, observando las maniobras de adelantamiento en detalle, como a nivel macroscópico o de sección.

5.2.2.1.5 Validación del modelo de microsimulación del tráfico

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 la Tabla 36 se muestran los resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros observadas y simuladas para los cuatro escenarios de validación del modelo. Los valores medios observados y simulados de las velocidades medias de recorrido de los ligeros se compararon mediante la prueba de medias *t*, obteniendo para los cuatro escenarios *p*-valores mayores de 0.05, confirmando que no existen diferencias estadísticamente significativas de las medias con un nivel de confianza del 95%.

Las distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los ligeros observadas y simuladas también se compararon mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov, obteniendo en los cuatro escenarios que no existían diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones simuladas y observadas con un nivel de confianza del 95%.

Escenario	Observado		Simulado		K-S test			t test	
	<i>N</i>	Media (km/h)	<i>N</i>	Media (km/h)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor	<i>t</i>	p-valor
Val1	19	65.18	334	60.84	0.25	1.07	0.207	1.94	0.053
Val2	15	65.78	293	63.26	0.32	1.21	0.106	1.24	0.214
Val3	34	61.47	631	62.06	0.17	0.94	0.341	-0.39	0.694
Val4	27	63.99	477	63.11	0.09	0.44	0.990	0.48	0.629

Tabla 36. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de validación de la CV-502.

Los resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo para los cuatro escenarios de validación a partir de datos observados y simulados se presentan en la Tabla 37. Los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov comparando las distribuciones de los intervalos de tiempo entre usuarios muestran que no existen diferencias

estadísticamente significativas entre los valores observados y simulados para ningún escenario de validación, tanto en la entrada como en la salida del tramo de estudio, con un nivel de significancia del 5%.

	Escenario	Observado		Simulado		K-S test		
		N	Media (s)	N	Media (s)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor
Entrada tramo	Val1	30	29.36	1825	29	0.14	0.78	0.571
	Val2	20	41.66	1224	42.98	0.11	0.47	0.978
	Val3	44	19.28	2660	20.03	0.16	1.07	0.202
	Val4	33	25.01	1939	27.33	0.12	0.74	0.645
Salida tramo	Val1	30	30.5	1696	31.12	0.09	0.5	0.964
	Val2	20	40.53	1149	45.47	0.16	0.7	0.719
	Val3	44	20.03	2511	21.21	0.08	0.55	0.921
	Val4	33	29.43	1813	29.17	0.16	0.9	0.404

Tabla 37. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de validación de la CV-502.

Otra variable utilizada para validar el modelo a nivel macroscópico o de sección fue el porcentaje de vehículos en cola a la entrada y a la salida del tramo de carretera. Para su cálculo se consideraron todos los usuarios presentes en la vía, y el tiempo considerado para que un usuario circule en cola del precedente fue menor de 3 segundos.

La Tabla 38 muestra los resultados obtenidos en los extremos del tramo para los cuatro escenarios de validación. El valor del RMSE a la entrada del tramo fue del 4.60%, mientras que en la salida fue del 4.40%. Estos valores fueron ligeramente mayores que los obtenidos en el proceso de calibración, aun así, y teniendo en cuenta que esta variable es difícil de ajustar debido a que depende del orden de salida de los usuarios en cada replicación de las simulaciones, se consideraron valores admisibles. La Tabla 38 también muestra los valores del porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) calculados para cada escenario de validación. Estos valores no se consideran adecuados para analizar la influencia del tráfico ciclista, ya que para su cálculo solamente se consideran parámetros relativos a la demanda motorizada y al tramo de carretera.

Escenario	Entrada tramo			Salida tramo			PTSF
	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	
Val1	20.00%	22.00%	-2.00%	20.00%	19.00%	1.00%	16.20%
Val2	15.00%	14.70%	0.30%	20.00%	13.40%	6.60%	13.51%
Val3	22.70%	31.10%	-8.40%	20.50%	26.10%	-5.60%	27.50%
Val4	24.20%	20.80%	3.40%	18.20%	18.70%	-0.50%	23.72%
RMSE			4.60%			4.40%	

Tabla 38. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado en la entrada y salida del tramo y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de validación de la CV-502.

Después de los procesos de calibración y validación, el modelo puede ser utilizado para calcular las variables necesarias para analizar la aficción que el tráfico ciclista puede tener sobre la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales estrechas considerando los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo.

5.2.2.2 Tramo de la carretera CV-310

En este apartado se presentan los resultados necesarios para modelizar el tramo de estudio situado en la CV-310. Estos resultados se corresponden con las características geométricas del tramo de carretera y con las observaciones del tráfico, tanto a nivel microscópico como macroscópico, realizadas en el propio tramo. También se muestran los resultados de los procesos de calibración y validación del modelo de microsimulación.

5.2.2.2.1 Características geométricas del tramo de estudio

Para modelar el tramo en el microsimulador de tráfico Aimsun Next es necesario definir algunas características geométricas específicas que han sido observadas mediante mediciones en el propio tramo o mediante el uso de programas informáticos que permiten obtener esta información.

La longitud total del tramo es de 4900 metros, siendo el ancho de los carriles de 3.2 metros. La pendiente del tramo se ha considerado nula a efectos del modelado del tramo en el microsimulador.

La velocidad límite en este tramo es de 80 km/h, sin embargo, en algunos subtramos se dispone de velocidades límite específicas debido a la existencia de curvas (Tabla 39).

Sentido decreciente				Sentido creciente			
Inicio	Fin	Longitud	Límite velocidad	Inicio	Fin	Longitud	Límite velocidad
0	2380	2380 m	80 km/h	0	1413	1413 m	80 km/h
2381	3376	995 m	60 km/h	1414	2424	1010 m	60 km/h
3377	4900	1523 m	80 km/h	2425	4900	2475 m	80 km/h

Tabla 39. Límites de velocidad en el tramo de la CV-310.

Para modelar correctamente el tramo en Aimsun Next es necesario introducir las limitaciones existentes para el adelantamiento entre vehículos motorizados. Estas limitaciones se insertan como líneas de separación de sentidos de circulación, situadas en el centro de la calzada. En la Tabla 40 se muestran la disposición de líneas continuas y discontinuas observadas en el tramo de la CV-310.

Sentido decreciente				Sentido creciente			
Inicio	Fin	Longitud	Línea	Inicio	Fin	Longitud	Línea
0	35	35	continua	0	171	171	continua
36	595	559	discontinua	172	1317	1145	discontinua
596	750	154	continua	1318	1896	578	continua
751	1206	455	discontinua	1897	2076	179	discontinua
1207	1331	124	continua	2077	2306	229	continua
1332	2435	1103	discontinua	2307	3386	1079	discontinua
2436	2700	264	continua	3387	3528	141	continua
2701	2963	262	discontinua	3529	3987	458	discontinua
2964	3542	578	continua	3988	4151	163	continua
3543	4511	968	discontinua	4152	4825	673	discontinua
4512	4900	388	continua	4826	4900	74	continua

Tabla 40. Líneas centrales de separación de sentidos existentes en el tramo de la CV-310.

5.2.2.2.2 Resultados de las tomas de datos a nivel microscópico

En la CV-310 se registraron un total de 1722 interacciones entre el grupo de ciclistas y vehículos motorizados, de ellas 525 fueron maniobras de adelantamiento. Después de descartar los datos anómalos, por mal funcionamiento de la instrumentación o por que los ciclistas no circulaban en la configuración correcta, así como los adelantamientos que se produjeron en intersecciones o sus inmediaciones, quedaron un total de 495 adelantamientos registrados correctamente en el tramo de estudio.

Como se ha detallado en el apartado 5.9.1.2 el estudio se centra en las maniobras de adelantamiento realizadas por vehículos ligeros. En este tramo de estudio, un 92% de estos adelantamientos fue realizado por vehículos ligeros, un 4% por pesados y el 4% restante por motocicletas. Por tanto, finalmente el estudio se realizó a partir de 455 maniobras de adelantamiento mostradas en la Tabla 41.

Las maniobras de adelantamiento registradas en este tramo de estudio fueron generalmente lanzadas (78%), siendo en un 13% de los casos maniobras realizadas desde el seguimiento a los ciclistas, y en el 8% restante el vehículo adelantante circulaba en cola de otro vehículo. En este tramo el porcentaje de adelantamientos en los que se registró una invasión total del carril opuesto fue solamente del 9%, representando las maniobras sin invasión del carril opuesto un 22%, en el resto de casos la invasión fue parcial. Este resultado indica que en este tramo de carretera los vehículos realizaron una gran parte de los adelantamientos a ciclistas sin cambiar de carril, complicando el modelado del tramo en el microsimulador de tráfico, donde para realizar un adelantamiento si es necesario cambiar de carril completamente.

Configuración	Observaciones		Velocidad (km/h)		Separación (m)		Duración (s)	
	N	%	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.
Individual (1)	157	35%	70.12	11.17	1.80	0.42	2.90	1.46
2 en línea (2L)	33	7%	72.27	14.95	1.84	0.53	3.03	1.74
2 en paralelo (2P)	77	17%	62.51	11.26	1.73	0.41	4.42	1.73
4 en línea (4L)	42	9%	70.10	13.25	1.95	0.45	4.19	2.03
4 en paralelo (4P)	84	18%	67.49	16.94	1.67	0.42	4.26	1.50
10 en línea (10L)	30	7%	72.40	12.26	1.86	0.53	7.80	2.35
10 en paralelo (10P)	32	7%	55.90	11.90	1.77	0.55	7.03	2.04
Total	455	100%	67.67	13.66	1.78	0.45	4.15	2.23

Tabla 41. Maniobras de adelantamiento registradas con las bicicletas instrumentadas y valores de las principales variables para la CV-310.

Las velocidades del vehículo adelantante registradas durante las maniobras de adelantamiento no presentaron relación alguna con el grupo de ciclistas adelantado, tomando valores similares menos para el grupo de diez ciclistas circulando en paralelo donde se registraron velocidades menores del vehículo adelantante. La separación lateral media entre el vehículo adelantante y los ciclistas fue menor cuando los ciclistas circulaban en paralelo debido a la mayor ocupación de estos de la calzada, resultando en todos los casos un valor medio de las separaciones mayor al 1.5 metros exigido en la normativa.

Respecto a las duraciones del adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas se observa en la Tabla 41 que las duraciones generalmente aumentan al aumentar el número de ciclistas que forman el grupo, sin embargo, las diferencias son menores que las observadas en el tramo de la CV-502 donde la sección transversal de la carretera era más desfavorable. En cuanto a la configuración en línea o en paralelo de los grupos, generalmente se registraron mayores duraciones cuando los ciclistas circulaban en paralelo para grupos formados por dos y cuatro ciclistas, mientras que para los grupos más grande formados por diez ciclistas la configuración en línea presentó mayores duraciones.

5.2.2.2.3 Resultados de las tomas de datos a nivel macroscópico

La toma de datos en el tramo de estudio de la CV-310 se realizó un sábado de octubre de 2019, se inició a las 8:20 y tuvo una duración de 4.5 horas. Al tratarse de un sábado el número de ciclistas registrados se consideró suficiente para llevar a cabo el estudio.

Se registraron un total de 287 bicicletas en el sentido de estudio correspondiente a los PK decrecientes. La velocidad media de estas bicicletas fue de 34.85 km/h, con una desviación de 4.79 km/h. En cuanto a los vehículos motorizados, se registraron 777 en sentido decreciente con una velocidad media de recorrido de 69.93 km/h y una desviación de 6.78 km/h. En el sentido opuesto se registraron un total de 538 vehículos ligeros circulando a una velocidad media de recorrido de 68.51 km/h y con una desviación de 6.75 km/h.

Se obtuvieron los escenarios de tráfico horario equivalente, a partir de las observaciones cada 15 minutos (Figura 89).

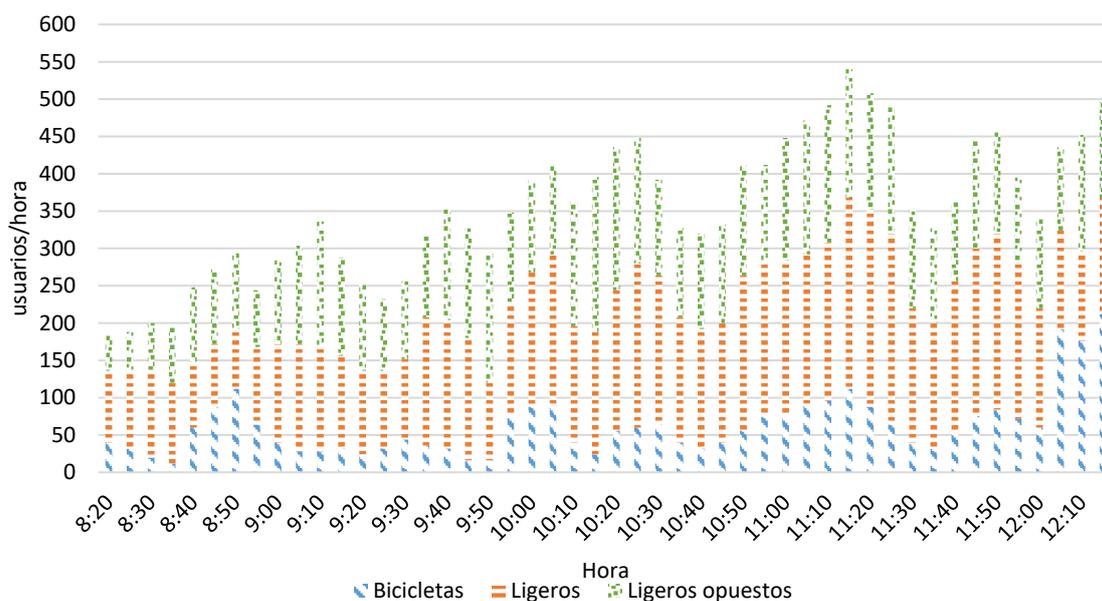


Figura 89. Intensidades horarias equivalentes de usuarios en sentido decreciente calculadas para la CV-310.

A partir de los escenarios de tráfico obtenidos de los datos observados en campo se eligieron tres escenarios para calibrar el modelo en el microsimulador de tráfico, y otros cuatro, diferentes a los primeros para validarlo (Tabla 42).

Los escenarios de calibración correspondieron con las intensidades máxima y mínima observadas de ciclistas, y otro con una intensidad media. Para validar se escogieron escenarios que representaran la variabilidad del tráfico ciclista. En la elección de los escenarios de calibración y validación se intentó que la demanda de vehículos motorizados fuese similar, con el fin de obtener la aficción de la variabilidad particular de la demanda ciclista a la hora de comparar estos escenarios entre ellos.

Intensidad (usuarios/h)	Calmin	Calmed	Calmax	Val1	Val2	Val3	Val4
Ligeros	164	200	156	124	168	152	208
Ligeros opuestos	148	128	128	156	128	120	164
1	4	36	24	36	16	8	32
2P	0	4	8	4	4	4	4
2L	0	0	12	12	4	0	8
4P	0	4	8	8	0	0	4
4L	4	0	8	4	0	4	0
10P	0	0	6	4	0	0	0
10L	0	0	2	0	0	4	0
Total ciclistas	20	60	208	156	32	72	72

Tabla 42. Escenarios de tráfico utilizados para calibración y validación (usuarios/h) para la CV-310.

En este tramo, a diferencia de lo observado en el tramo de la CV-502, los grupos de ciclistas observados circulaban tanto en línea como en paralelo, por tanto, los escenarios seleccionados para calibrar y validar el modelo se componen de grupos de ciclistas circulando en ambas configuraciones.

5.2.2.2.4 Calibración del modelo de microsimulación del tráfico

Este tramo de carretera presenta unas particularidades que hicieron necesario la adaptación del modelo de microsimulación del tráfico para poder representar las maniobras observadas.

La diferencia respecto al modelo desarrollado para el tramo de la CV-502 se basa particularmente en las duraciones del adelantamiento, que en este tramo fueron menores, sobre todo para los grupos formados por pocos ciclistas. Estas menores duraciones se debieron al comportamiento que los conductores presentaron en este tramo en concreto, donde se realizaban adelantamientos con una invasión mínima del carril opuesto, y en algunos casos sin invasión ninguna.

Por tanto, se requirió implementar una nueva mejora que permitiese adelantar a ciclistas con duraciones menores a las obtenidas normalmente en el modelo proporcionado por Aimsun Next. Esta mejora consiste en una implementación en Aimsun Next que permite realizar adelantamientos en carreteras bidireccionales a vehículos cuyo ancho sea inferior a la mitad del ancho del carril con el mínimo posible de dos pasos de simulación. Mediante esta implementación fue posible obtener duraciones de los adelantamientos menores a cuatro segundos, solamente cuando se realizaban adelantamientos a ciclistas, asegurando así un correcto comportamiento en los adelantamientos de los motorizados entre ellos; permitiendo discriminar el usuario al que se va a adelantar y adaptar el comportamiento durante el adelantamiento a los diferentes usuarios.

En la Tabla 43 se muestran los valores de los anchos de cada elemento generado en el microsimulador. A partir de estos valores se consiguieron adelantamientos con duraciones reducidas a los elementos con anchos menores a la mitad del ancho del carril correspondiente a 1.6 metros.

Elemento	Anchura en metros
Carril	3.2
Vehículo ligero	2
Ciclistas en línea	0.5
Ciclistas en paralelo	1.2

Tabla 43. Ancho de los elementos utilizados en el modelo de microsimulación del tráfico de la CV-310 en Aimsun Next.

En este tramo se observaron maniobras de adelantamiento con duraciones inferiores 3 segundos (ver Tabla 41), que se corresponden con comportamientos más arriesgados por parte de los conductores, adelantando en muchos casos sin variar su trayectoria y sin cumplimiento de la separación mínima legal de 1.5 m. Este comportamiento es complicado de simular en el modelo del tramo en Aimsun Next, donde se requiere el cambio total del carril para realizar el adelantamiento. Sin embargo, después de realizar varios procesos de calibración variando los parámetros, se obtuvieron unas longitudes equivalentes para los diferentes grupos de ciclistas que permitieron obtener valores aceptables de duraciones y del resto de variables utilizadas para la calibración del modelo. No obstante, en el modelo no se han obtenido duraciones de adelantamientos con duraciones inferiores a 3 segundos.

En las simulaciones realizadas para este tramo se consideró un paso de simulación de 0.5 s para asegurar duraciones con suficiente precisión para conseguir valores similares a los observados. Esta modificación se tradujo en la obtención de bases de datos para cada simulación con una elevada extensión respecto a las obtenidas en el modelo de la CV-502, generando unos procesos de calibración y validación del modelo más complejos.

La calibración se llevó a cabo en dos partes, primero a un nivel microscópico, donde se calibró la propia maniobra de adelantamiento de tal manera que se obtuvieron duraciones de los adelantamientos a cada grupo de ciclistas similares a los obtenidos en las observaciones de campo; seguidamente se calibró a nivel macroscópico, donde se calibraron los parámetros del modelo para obtener variables macroscópicas, como las velocidades medias de recorrido y los porcentajes de vehículos en cola.

Se realizaron varios procesos de calibración en los que se ajustaron los parámetros del modelo hasta conseguir que los resultados de las simulaciones se ajustaran suficientemente a las observaciones. Los valores de los principales parámetros calibrados para el modelo correspondiente a la CV-310 se muestran en la Tabla 44.

Segmento	Diferencia de velocidades para adelantar en línea continua (km/h) = 20 km/h			
	Longitud tramos generación de colas (m) = 50 m			
Usuarios	Longitudes equivalentes (m): Individual = 0.2 m; 2P = 4 m; 4P = 6 m; 10P = 33 m			
	2L = 0.5 m; 4L = 5 m; 10L = 35 m			
	Velocidad máxima deseada Ligeros = media 83 km/h (Desv. 7 km/h)			
	Velocidad máxima deseada bicicletas = media 34 km/h (Desv. 1 km/h)			
Experimento	Demora entre adelantamientos simultáneos (s) = 0 s			
	Número de adelantamientos simultáneos permitidos = 5			
	Rango máximo en la cola para desear adelantar = 3			
	Umbral de tiempo hasta fin de tramo (s) = 0 s			

Tabla 44. Valores de los principales parámetros del modelo de microsimulación de tráfico calibrados para la CV-310.

En la Tabla 45 se muestran las duraciones de los adelantamientos obtenidas para cada grupo de ciclistas a partir de las simulaciones de los escenarios de calibración con demanda máxima, media y mínima de ciclistas. Las medias y las medianas de las duraciones obtenidas en las simulaciones y observadas en campo solamente presentaron diferencias estadísticamente significativas para los ciclistas que circulan individualmente, presentando valores aceptables para el resto de configuraciones. Las pruebas de Kolmogorov-Smirnov que comparan las distribuciones de las duraciones simuladas y observadas, no presentaron diferencias estadísticamente significativas solamente para las configuraciones correspondientes a los grupos de diez ciclistas con un nivel de significancia del 5%.

Grupos de ciclistas	Observaciones			Simulaciones			Test de medias		Test de medianas		Test de K-S	
	N	Media	Desv.	N	Media	Desv.	t	p-valor	W	p-valor	DN	p-valor
1	157	2.90	1.46	151	3.30	0.49	-3.23	0.001	14735.0	0.0001	0.66	0.0001
2L	33	3.03	1.74	53	3.33	0.51	-1.11	0.268	974.0	0.052	0.66	0.0001
2P	77	4.42	1.73	68	4.06	0.66	1.60	0.112	2375.0	0.331	0.43	0.0001
4L	42	4.19	2.03	48	4.01	0.54	0.57	0.567	763.0	0.471	0.45	0.0005
4P	84	4.26	1.50	99	4.27	0.77	-0.06	0.950	3978.5	0.610	0.40	0.0001
10L	30	7.80	2.35	35	7.38	1.07	0.76	0.451	270.0	0.390	0.36	0.0787
10P	32	7.03	2.04	58	6.66	1.03	1.04	0.302	615.0	0.346	0.31	0.0502

Tabla 45. Resultados estadísticos de las duraciones de los adelantamientos (s) simuladas según la configuración del grupo de ciclistas para la CV-310.

La segunda parte del proceso de calibración corresponde a la calibración a nivel macroscópico del modelo, y se llevó a cabo comparando las velocidades medias de recorrido de los vehículos motorizados ligeros, los intervalos de tiempo entre usuarios y los porcentajes de vehículos en cola a la entrada y a la salida del tramo para los tres escenarios de calibración.

La Figura 90 muestra las distribuciones de velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros simuladas y observadas para los tres escenarios de calibración. El RMSE calculado a partir de las velocidades medias de recorrido observadas y resultados de las simulaciones considerando los tres escenarios de calibración del modelo para el tramo de la CV-310 fue de 1.18 km/h.

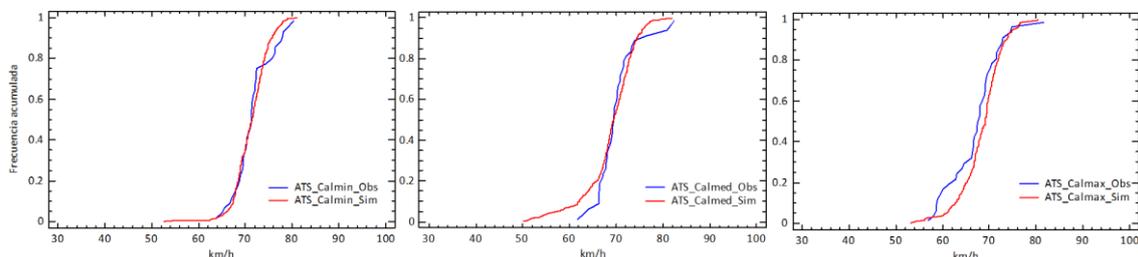


Figura 90. Distribuciones de la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros observada y simulada para los escenarios de calibración en la CV-310.

En la Tabla 46 se observan los resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido del tramo de los vehículos ligeros obtenidas a partir de las observaciones y de las simulaciones. La prueba de comparación de medias realizada ha mostrado que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los valores observados y simulados para los tres escenarios de calibración, resultando en todos ellos *p-valores* mayores de 0.05. Las distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros se han comparado con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, resultando en los tres escenarios que no existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% entre las distribuciones observadas y simuladas.

Escenario	Observado		Simulado		K-S test			t test	
	N	Media (km/h)	N	Media (km/h)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor	t	p-valor
Calmin	38	71.55	359	71.29	0.148	0.865	0.450	0.42	0.676
Calmed	40	70.02	417	68.82	0.133	0.807	0.549	1.35	0.176
Calmax	39	67.00	297	68.43	0.197	1.159	0.136	-1.84	0.067

Tabla 46. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de calibración de la CV-310.

La siguiente variable utilizada para calibrar el modelo de microsimulación del tráfico desarrollado para este tramo de carretera fue el intervalo de tiempo entre usuarios registrado a la entrada y a la salida del tramo. En la Figura 91 se muestran las distribuciones del intervalo obtenidas de las simulaciones y observadas para los tres escenarios de calibración en los dos extremos del tramo de carretera.

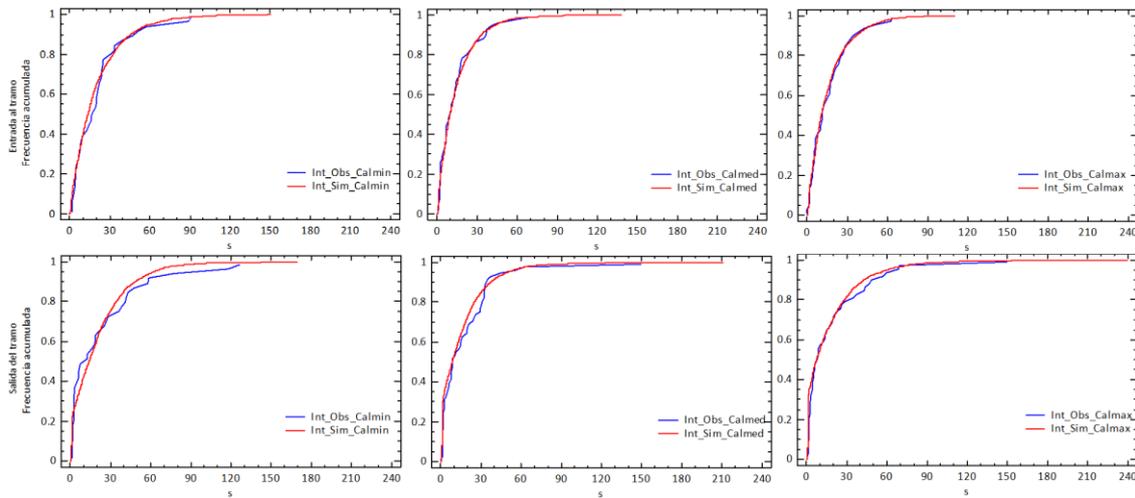


Figura 91. Distribuciones del intervalo de tiempo entre usuarios observado y simulado en la entrada y salida del tramo de estudio para los escenarios de calibración en la CV-310.

Los resultados estadísticos de los intervalos de tiempo entre usuarios simulados y observados se muestran en la Tabla 47, donde se observa que solamente para el escenario de calibración relativo a la demanda máxima de bicicletas (Calmax) se ha obtenido un p-valor menor de 0.05 en la prueba de comparación de distribuciones, indicando que en este caso sí existe una diferencia estadísticamente significativa entre la distribución observada y la simulada del intervalo de tiempo entre usuarios en la salida del tramo. En todos los otros escenarios de calibración la prueba de comparación de distribuciones del intervalo de tiempo entre usuarios no ha presentado diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

	Escenario	Observado		Simulado		K-S test		
		N	Media (s)	N	Media (s)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor
Entrada tramo	Calmin	42	20.95	2673	19.94	0.11	0.72	0.680
	Calmed	63	13.98	3735	14.33	0.08	0.68	0.748
	Calmax	55	15.67	3440	15.5	0.06	0.47	0.980
Salida tramo	Calmin	42	22.66	2657	21.02	0.19	1.24	0.091
	Calmed	63	17.06	3610	14.83	0.15	1.20	0.113
	Calmax	55	18.5	3238	16.46	0.24	1.78	0.004

Tabla 47. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de calibración de la CV-310.

La siguiente variable utilizada en el proceso de calibración macroscópica del modelo fue el porcentaje de usuarios en cola en los dos extremos del tramo de carretera. La Tabla 48 representa los valores observados y simulados de esta variable para los tres escenarios de calibración en la entrada y la salida del tramo. Los valores del RMSE considerando los tres escenarios fueron del 3.70% y del 4.00% para la entrada y la salida del tramo respectivamente. Estos valores se consideran aceptables, considerando la dificultad de obtener más precisión en esta variable debido a la aleatoriedad en la generación de usuarios en el microsimulador.

En esta tabla también se muestran los valores calculados del porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) según las formulaciones recomendadas en el HCM 2016. Esta variable, sin embargo, carece de representatividad del efecto de la presencia de tráfico ciclista en el tramo, ya que para su cálculo solamente se tiene en cuenta el tráfico motorizado presente en cada escenario. De hecho, se observa como el PTSF presenta un valor más elevado para el escenario

Calmed, en el que existe una demanda intermedia de ciclistas, mientras que los escenarios Calmin y Calmax presentan valores muy similares.

Escenario	Entrada tramo			Salida tramo			PTSF
	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	
Calmin	12.00%	15.00%	-3.00%	30.00%	26.00%	4.00%	28.65%
Calmed	25.00%	21.00%	4.00%	32.00%	36.00%	-4.00%	33.74%
Calmax	15.00%	19.00%	-4.00%	33.00%	37.00%	-4.00%	28.34%
RMSE			3.70%			4.00%	

Tabla 48. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de calibración en la entrada y salida del tramo de la CV-310.

A partir de los resultados presentados en este apartado se considera el modelo de microsimulación del tráfico debidamente calibrado particularmente para el tramo de carretera de la CV-310.

5.2.2.2.5 Validación del modelo de microsimulación del tráfico

El modelo calibrado para la CV-310 se valida con 4 escenarios de tráfico distintos a los utilizados para la calibración. Los escenarios de validación abarcan un amplio rango de intensidades de bicicletas, sin embargo, los escenarios de tráfico de motorizados son similares, ya que en el periodo de las observaciones la demanda motorizada fue bastante constante.

El proceso de validación se lleva a cabo a nivel macroscópico comparando los resultados de las simulaciones con los datos observados en el tramo.

La primera variable utilizada fue la velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros. En la Tabla 49 se muestran los resultados estadísticos obtenidos de la comparación de las observaciones y las simulaciones para esta variable en los cuatro escenarios de validación del modelo. Las pruebas de comparación de medias resultaron para los cuatro escenarios con *p*-valores mayores de 0.05, indicando la no existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las velocidades observadas y simuladas con un nivel de confianza del 95%.

Las pruebas de comparación de distribuciones presentaron una diferencia estadísticamente significativa para el escenario de validación Val4 entre las distribuciones observada y simulada con un nivel de significancia del 5%, resultando para los otros tres escenarios de validación en la no existencia de diferencias. El RMSE de la velocidad media de recorrido observada y resultado de las simulaciones para los cuatro escenarios utilizados en la validación del modelo resultó en 1.08 km/h.

Escenario	Observado		Simulado		K-S test			t test	
	N	Media (km/h)	N	Media (km/h)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor	t	p-valor
Val1	29	67.45	375	67.05	0.09	0.45	0.987	0.38	0.701
Val2	42	69.28	373	70.39	0.24	1.46	0.056	-1.65	0.100
Val3	38	71.8	321	70.17	0.16	0.92	0.367	1.76	0.079
Val4	41	67.8	416	68.57	0.27	1.68	0.007	-0.89	0.373

Tabla 49. Resultados estadísticos de las velocidades medias de recorrido observadas y simuladas para los escenarios de validación de la CV-310.

La siguiente variable utilizada para validar el modelo fue el intervalo de tiempo entre usuarios calculado en los dos extremos del tramo de estudio. Para el cálculo del intervalo se consideraron todos los usuarios presentes en la vía, tanto ciclistas como vehículos ligeros. La Tabla 50 presenta los resultados estadísticos de los valores de los intervalos de tiempo entre usuarios para los

cuatro escenarios de validación. La prueba de comparación de distribuciones Kolmogorov-Smirnov realizada solamente presentó diferencias estadísticamente significativas entre las distribuciones observada y simulada para el escenario de validación Val4 en la salida del tramo, indicando para el resto de escenarios de tráfico, tanto en la entrada como en la salida del tramo, la no existencia de diferencias entre las distribuciones con un nivel de confianza del 95%.

	Escenario	Observado		Simulado		K-S test		
		N	Media (s)	N	Media (s)	Dist. Max.	Dist. Adm.	p-valor
Entrada tramo	Val1	45	15.46	2930	18.19	0.11	0.74	0.643
	Val2	49	18.26	3001	17.76	0.07	0.51	0.960
	Val3	43	20.36	2576	20.67	0.19	1.27	0.080
	Val4	63	14.07	3967	13.49	0.09	0.74	0.652
Salida tramo	Val1	47	17.15	2749	19.45	0.15	1.03	0.243
	Val2	49	20.14	2920	18.32	0.15	1.07	0.202
	Val3	43	25.73	2530	21.1	0.19	1.21	0.109
	Val4	65	18.08	3801	14.05	0.26	2.09	0.0003

Tabla 50. Resultados estadísticos del intervalo de tiempo entre usuarios a la entrada y a la salida del tramo de estudio observado y simulado para los escenarios de validación de la CV-310.

La validación del modelo se completó con los datos del porcentaje de usuarios en cola en los dos extremos del tramo. Esta variable se calculó considerando a todos los usuarios presentes en cada escenario de validación, y considerando un intervalo de tiempo menor de 3 segundos entre dos usuarios para considerar que el segundo circula en cola. Los valores simulados y observados del porcentaje de usuarios en cola, en los dos extremos del tramo, y para los cuatro escenarios de validación, se muestran en la Tabla 51. Los valores del RMSE obtenidos considerando los cuatro escenarios fueron del 4.12% en la entrada y del 6.45% en la salida del tramo.

Esta tabla también muestra el porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) calculado a partir de la formulación expresada en el HCM 2016, sin embargo, esta variable no tiene en cuenta el tráfico ciclista que circula por el tramo de carretera convencional, y sus valores difieren del porcentaje de usuarios en cola calculado en la salida del tramo.

Escenario	Entrada tramo			Salida tramo			PTSF
	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	%VC Obs.	%VC Sim.	Dif.	
Val1	15%	15%	0.00%	36%	32%	4.00%	22.99%
Val2	18%	17%	1.00%	31%	28%	3.00%	29.87%
Val3	21%	14%	7.00%	19%	25%	-6.00%	28.13%
Val4	22%	21%	1.00%	25%	33%	-8.00%	33.47%
RMSE			4.12%			6.45%	

Tabla 51. Porcentaje de vehículos en cola (%VC) observado y simulado en la entrada y salida del tramo y porcentaje de tiempo en seguimiento (PTSF) para los escenarios de validación de la CV-310.

A la vista de los resultados obtenidos en los procesos de calibración y validación, se considera que el modelo de microsimulación del tráfico correspondiente al tramo de la carretera CV-310 está correctamente calibrado y validado, y, por tanto, puede ser utilizado para simular escenarios de tráfico considerando a ciclistas circulando en línea y en paralelo en carreteras con secciones más favorables para la circulación de ciclistas con arcén de 1.5 m.

5.2.3 Análisis de la funcionalidad del tráfico a partir del uso de modelos de microsimulación del tráfico

En este apartado se utiliza el modelo de microsimulación del tráfico adaptado a la circulación de bicicletas, calibrado y validado en apartados anteriores, para simular diferentes escenarios de tráfico variando el volumen de vehículos motorizados y de bicicletas. A partir de los resultados de las simulaciones se analiza la afeción sobre diferentes medidas de desempeño para caracterizar la afeción a la funcionalidad del tráfico.

Una parte importante de esta investigación es la determinación de medidas de desempeño que caractericen correctamente la funcionalidad del tráfico considerando la presencia de ciclistas en las carreteras. Para ello, se parte de las medidas de desempeño consideradas en el Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016), y en el estudio Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance (Transportation Research Board, 2018). También se analizan otras medidas de desempeño propuestas en esta investigación que pueden caracterizar la funcionalidad del tráfico teniendo en cuenta la circulación de ciclistas, como el tiempo de demora acumulada de los vehículos ligeros o el número de adelantamientos por vehículo registrados en el tramo.

Se presentan primero los resultados de las simulaciones realizadas a partir de los escenarios de tráfico observados en cada tramo. A continuación, se describe el diseño de escenarios de tráfico considerando variaciones en el volumen de vehículos a motor y de bicicletas, basado particularmente en los datos de tráfico de cada tramo. Seguidamente se simulan estos escenarios mediante el uso del software Aimsun Next 20 especialmente adaptado, calibrado y validado. Finalmente se analizan los resultados de las simulaciones.

Este estudio se realiza particularmente para los modelos desarrollados para los dos tramos de estudio correspondientes a las carreteras CV-502 y CV-310.

5.2.3.1 Simulaciones de los escenarios de tráfico observados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de los escenarios de tráfico observados en cada tramo y utilizados para calibrar los modelos. Estos escenarios se corresponden con las demandas mínima, media y máxima de bicicletas observadas. Por tanto, los resultados obtenidos mostraron la afeción sobre la funcionalidad del tráfico de escenarios de tráfico reales correspondientes a situaciones normalmente observadas en estas carreteras.

Los resultados presentados en este apartado son: las duraciones del adelantamiento registradas para cada grupo de ciclistas, las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros, el número de adelantamientos realizados por vehículo, el tiempo de demora de los vehículos ligeros y el porcentaje de vehículos en cola en los extremos del tramo, todos ellos para cada escenario de tráfico simulado.

En la simulación de cada escenario de tráfico se realizaron quince replicaciones, considerándose un número suficiente para tener en cuenta la aleatoriedad asociada a cada replicación, siendo la media de todas las replicaciones el resultado final mostrado. Estos resultados se obtuvieron utilizando el software Aimsun Next, y/o las Apis utilizadas para extraer datos de las simulaciones.

5.2.3.1.1 Resultados del tramo de la carretera CV-502

En este apartado se analizan los resultados de las simulaciones de los tres escenarios utilizados para calibrar el modelo de microsimulación considerando a los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo independientemente. En este tramo los grupos de ciclistas observados

recorrieron el tramo en paralelo, por tanto, en el proceso de calibración macroscópica se consideraron los grupos de ciclistas circulando en esta configuración. Las longitudes equivalentes correspondientes a las configuraciones de dos, cuatro y diez ciclistas circulando en línea se calibraron solamente a nivel microscópico.

Así, para analizar los resultados de los escenarios con demandas mínima, media y máxima de ciclistas observados se simularon un total de seis escenarios de tráfico. Los escenarios simulados a partir de las observaciones fueron:

- Todos los ciclistas en línea para los tres escenarios de tráfico utilizados en la calibración, escenarios: Calmin_L, Calmed_L y Calmax_L.
- Todos los ciclistas en paralelo para los tres escenarios de tráfico utilizados en la calibración, escenarios: Calmin_P, Calmed_P y Calmax_P.

A partir de las observaciones en campo realizadas mediante las bicicletas instrumentadas se obtuvieron las distribuciones de las duraciones del adelantamiento considerando diferentes agrupaciones de ciclistas. En la Figura 92 se puede observar como la tendencia fue que a mayor número de ciclistas formando el grupo, se registraron mayores duraciones, y para grupos formados por el mismo número de ciclistas se registraron mayores duraciones cuando circulaban en línea que cuando lo hicieron en paralelo. Mayores duraciones del adelantamiento implican mayores tiempos en el carril opuesto, generando un mayor riesgo de exposición a colisión frontal con los vehículos opuestos.

En el tramo de carretera convencional estrecha donde se desarrolló el estudio, la mayoría de los grupos ciclistas observados circulaban en paralelo, esta configuración presentó duraciones menores del adelantamiento y por tanto una menor exposición al riesgo para los conductores.

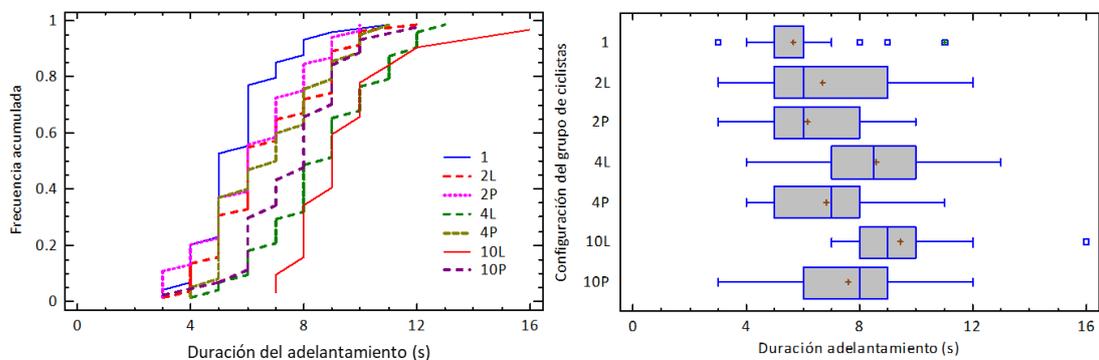


Figura 92. Distribuciones de las duraciones del adelantamiento (s) a los diferentes grupos de ciclistas obtenidas en campo en la CV-502.

En la Figura 93 se muestran las distribuciones de velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros resultantes de las simulaciones de los escenarios de calibración considerando a los ciclistas circulando en línea y en paralelo. Se observa que la velocidad media de recorrido del tramo de los ligeros se redujo a medida que aumentaba la demanda de ciclistas.

Se realizó la prueba para comparar las medianas de las distribuciones, ya que los datos no provenían de distribuciones normales, los resultados mostraron que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, las medianas y las distribuciones de las velocidades considerando los escenarios de demanda máxima y media no mostraron diferencias estadísticamente significativas con una significancia del 5%. Esto indica que, a partir de un cierto nivel de tráfico ciclista cercano a la

demanda media observada, el efecto sobre la velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros es menor a medida que aumenta el volumen de ciclistas.

Las medianas entre los escenarios considerando a los grupos en línea y en paralelo no presentaron diferencias estadísticamente significativas para los tres escenarios de tráfico, indicando que para estos niveles de tráfico la configuración en la que circulan los grupos de ciclistas no influyó en la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros.

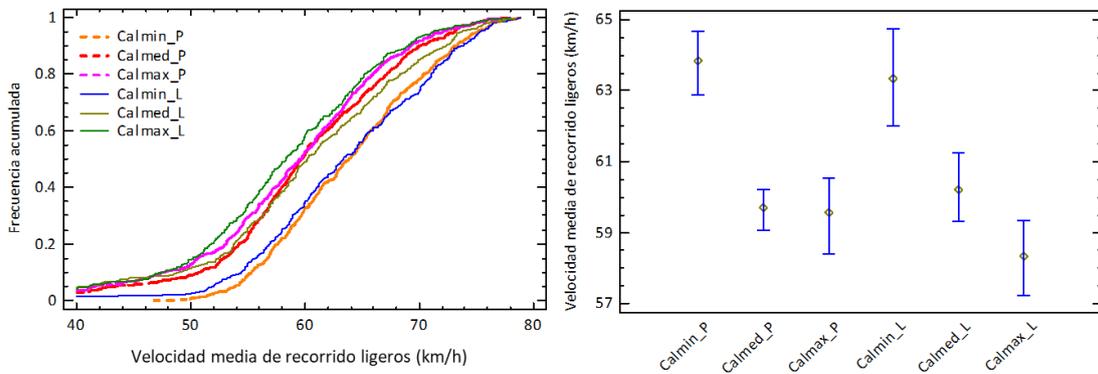


Figura 93. Distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros (km/h) (izquierda), y medianas e intervalos del 95% de confianza (derecha) obtenidas en las simulaciones de los escenarios observados en la CV-502.

Otra variable analizada para caracterizar la seguridad y la funcionalidad del tráfico fue el número de adelantamientos realizados por vehículo durante el recorrido del tramo. En la Figura 94 izquierda se pueden observar las distribuciones del número medio de adelantamientos por vehículo obtenido de las quince replicaciones realizadas para cada uno de los seis escenarios simulados. Es evidente que a mayor volumen de ciclistas circulando en el tramo se realizaron más maniobras de adelantamiento.

Los resultados de la prueba ANOVA constataron las diferencias entre las medias de los escenarios simulados ($F=116.65$, $p\text{-valor}<0.05$). Las medias para los escenarios de demanda media y máxima de ciclistas presentaron valores similares, indicando que el efecto de la presencia de ciclistas sobre el número de adelantamientos realizados por vehículo ligero es menor a partir de una cierta demanda ciclista.

Sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los adelantamientos registrados considerando las configuraciones de los grupos de ciclistas en línea y en paralelo (Figura 94 derecha) para estos niveles de tráfico.

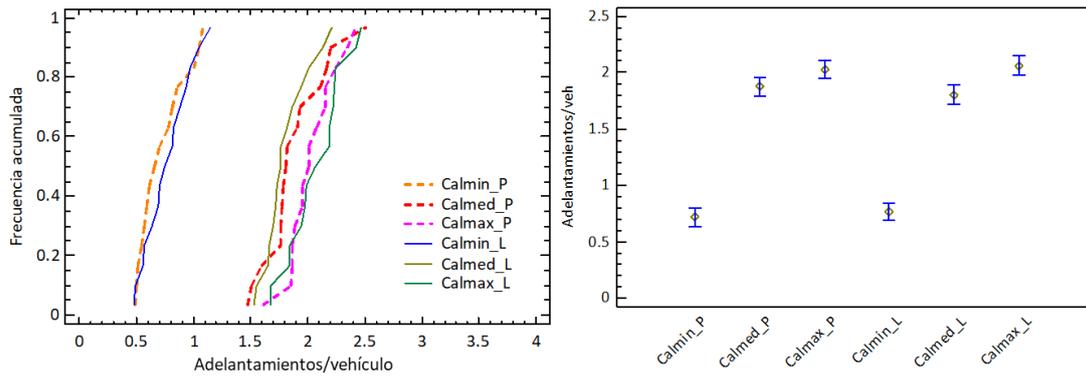


Figura 94. Distribuciones de los adelantamientos realizados por vehículo (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-502.

En la Figura 95 se han representado los valores del tiempo de demora acumulada de los vehículos ligeros obtenidos en las quince replicaciones de cada escenario de calibración. Se puede observar como el tiempo de demora aumentó al incrementar el tráfico ciclista. También se observa que, al aumentar la demanda de ciclistas, el tiempo de demora presentó una mayor dispersión. Esta mayor dispersión se debe a que al simular escenarios con una elevada demanda ciclista existen vehículos que se encuentran con más ciclistas y otros con menos, y su tiempo de demora depende del número de ciclistas con los que interaccione.

Los resultados de la prueba ANOVA realizada ($F=63.37$, $p\text{-valor}<0.05$) indicaron que las medias de las seis distribuciones de tiempo de demora presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 5% de significación. Cuando los grupos circularon en línea, la media del tiempo de demora de los vehículos motorizados no presentó diferencias estadísticamente significativas respecto a la configuración en paralelo, sin embargo, los valores de la demora media y las dispersiones fueron ligeramente mayores para las configuraciones en línea debido a la mayor longitud de los grupos de ciclistas que se traduce en una mayor dificultad para adelantarles sobre todo en escenarios con demandas de tráfico más elevadas (Figura 95 derecha). Esta diferencia, a pesar de no ser significativa en los escenarios simulados, va aumentando a medida que aumenta la demanda ciclista, poniendo de manifiesto que la configuración del grupo de ciclistas tiene mayor importancia cuando el tráfico es elevado.

El tiempo de demora acumulada de los vehículos ligeros es una variable difícil de medir en campo, en este estudio se ha obtenido mediante el uso del modelo de microsimulación, poniendo en valor el uso de esta metodología para obtener variables que pueden caracterizar la seguridad y la funcionalidad del tráfico.

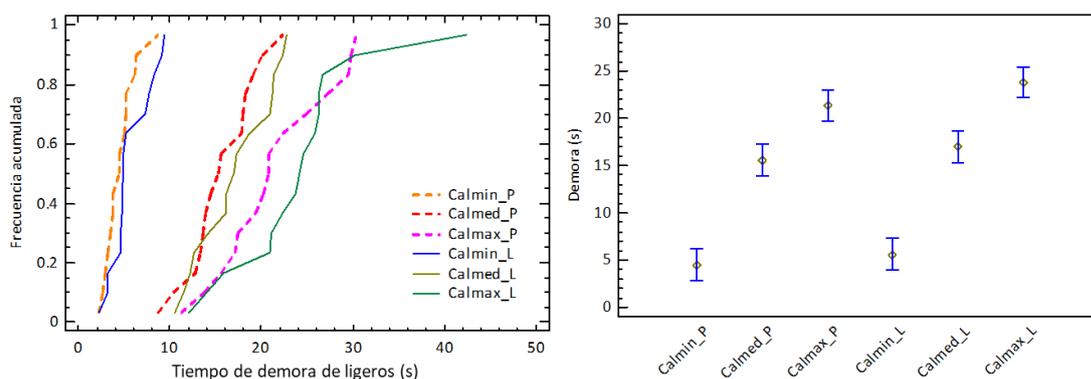


Figura 95. Distribuciones de las demoras acumuladas (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-502.

Otra medida de desempeño analizada en este estudio fue el porcentaje de vehículos en cola (%VC) a la entrada y a la salida del tramo de estudio. Esta variable se calculó en los escenarios considerando la demanda mínima, media y máxima de ciclistas registrados.

En la Tabla 52 se pueden observar los valores calculados del porcentaje de vehículos en cola resultados de las simulaciones. Para cada escenario, la variación entre el inicio y el final del tramo no es muy significativa, presentando valores muy similares en los dos puntos para los tres escenarios analizados. Si se observa la variación entre escenarios, sí se aprecian más diferencias. El escenario con demanda mínima de bicicletas presentó valores del porcentaje de vehículos en cola menores, cercanos al 20%, mientras que los escenarios con demandas media y máxima presentaron valores más elevados alrededor del 30%.

Por tanto, la presencia de tráfico ciclista aumentó el valor del porcentaje de vehículos en cola en carreteras convencionales estrechas. Los resultados obtenidos considerando a los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo fueron muy similares, no presentando diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones.

Escenario	Inicio del tramo	Fin del tramo
	%VC Sim.	%VC Sim.
Calmin	18.80%	19.10%
Calmed	32.40%	28.20%
Calmax	29.40%	28.90%

Tabla 52. Resultados estadísticos de las simulaciones para el porcentaje de vehículos en cola (%VC) en los escenarios observados de la CV-502.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de los escenarios de tráfico correspondientes a las demandas mínima, media y máxima observadas en el tramo de estudio mostraron una variación de las variables analizadas a medida que aumentó la demanda de ciclistas en el tramo. Concretamente se observó una reducción de la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros, un aumento del número de adelantamientos por vehículo, un aumento del tiempo de demora de los ligeros y un aumento del porcentaje de usuarios en cola en los dos extremos del tramo.

Las diferencias entre las configuraciones en línea y en paralelo de los grupos de ciclistas en los niveles de tráfico analizados no fueron significativas para ninguna de las variables analizadas. Sin embargo, la configuración en la que circulan los grupos presentó una mayor influencia sobre el tiempo de demora a medida que aumentó el volumen de ciclistas en el tramo.

5.2.3.1.2 Resultados del tramo de la carretera CV-310

En este apartado se analizan los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de los tres escenarios utilizados para la calibración del modelo correspondientes a las demandas mínima, media y máxima de bicicletas observadas en el tramo de estudio.

En este tramo, en los escenarios de tráfico observados se registraron grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo indistintamente, por tanto, se simularon los tres escenarios de tráfico y se presentaron los resultados obtenidos considerando en cada uno de ellos la demanda ciclista observada.

La primera variable analizada fue la duración del adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas obtenida mediante los recorridos del tramo utilizando las bicicletas instrumentadas. En la Figura 96 se observa como las duraciones de los adelantamientos fueron similares para un ciclista individual y dos ciclistas circulando en línea. Los grupos de ciclistas formados por dos ciclistas circulando en paralelo, y cuatro ciclistas en línea y en paralelo también presentaron duraciones muy similares. Los grupos de diez ciclistas presentaron mayores duraciones que el resto de grupos, y en este caso, el efecto de la configuración en línea presento mayores duraciones que cuando circulaban en paralelo.

A la vista de los resultados de las duraciones del adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas, se deduce que en este tramo la configuración en línea y en paralelo influye de manera diferente según el número de ciclistas que formen el grupo, presentando mayores duraciones la configuración en paralelo en grupos pequeños y la configuración en línea en grupos formados por más ciclistas.

También se observa que las duraciones registradas en este tramo fueron muy reducidas, sobre todo para grupos formados por pocos ciclistas. En concreto para un ciclista individual y para dos ciclistas en línea se registraron duraciones de un segundo. Estos valores se deben al efecto de la geometría del tramo de carretera, y en gran medida al arcén coloreado, que genera adelantamiento sin cambio de trayectoria del adelantante, siendo más peligrosos para los ciclistas.

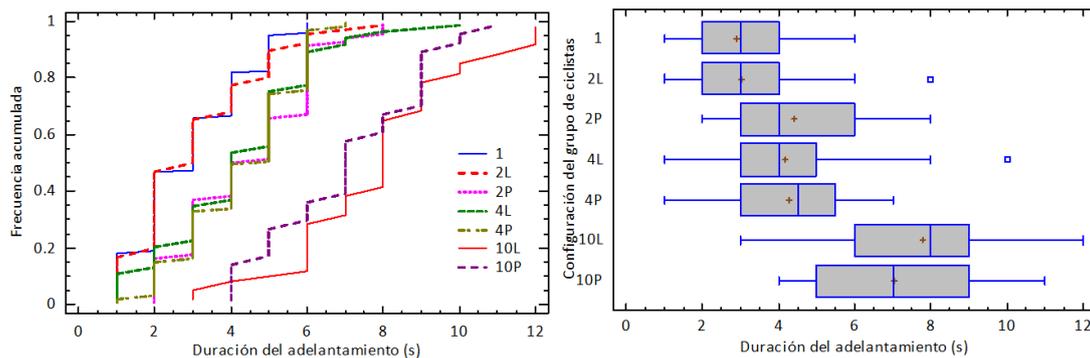


Figura 96. Distribuciones de las duraciones del adelantamiento (s) a los diferentes grupos de ciclistas obtenidas en campo en la CV-310. (homogeneizar)

La siguiente variable analizada fue la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros. En la Figura 97 se muestran las distribuciones de estas velocidades para los tres escenarios de demanda máxima, media y mínima de ciclistas observadas. Se observa como al aumentar la demanda ciclista en el tramo las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros descendieron. En la Figura 97 derecha se presentan las medianas y los intervalos de confianza correspondientes de los tres escenarios.

Al igual que en el tramo de carretera de la CV-502, se observa como a partir de una cierta demanda de ciclistas el efecto sobre la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros es menos severo, siendo las diferencias entre las medianas de las velocidades de los escenarios Calmed y Calmax no estadísticamente significativas con un nivel del 95% de confianza.

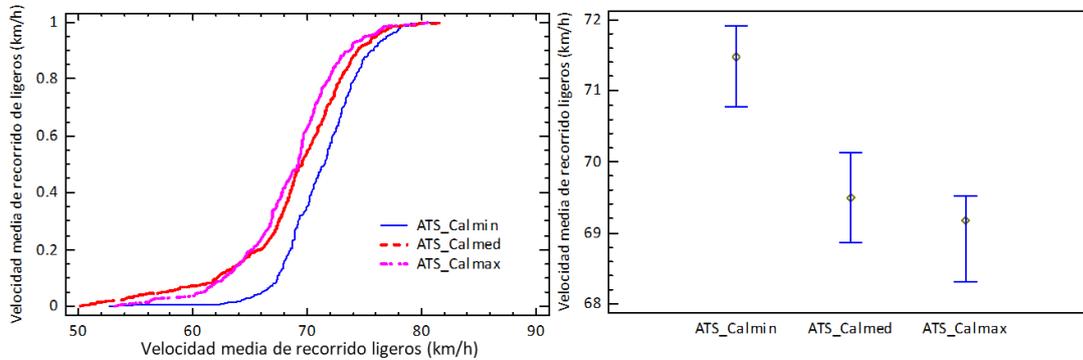


Figura 97. Distribuciones de las velocidades medias de recorrido de los vehículos ligeros (km/h) (izquierda), y medianas e intervalos del 95% de confianza (derecha) obtenidas en las simulaciones de los escenarios observados de la CV-310.

El efecto de la presencia de tráfico ciclista tuvo un efecto sobre el número de adelantamientos realizados por vehículo ligero durante su recorrido del tramo de estudio. En la Figura 98 se muestra este efecto, presentando la distribución del número de adelantamientos efectuados por vehículo ligero en cada uno de los tres escenarios simulados. Para cada escenario se han representado los valores de las replicaciones simuladas.

Se observa un incremento en el número de adelantamientos realizados a medida que aumenta el tráfico ciclista, al mismo tiempo también aumenta la dispersión en el número de los adelantamientos registrados considerando las replicaciones del mismo escenario. Esto se debe a que al simular escenarios con mayores demandas ciclistas el número de adelantamientos depende de los ciclistas que se encuentre cada vehículo en su recorrido del tramo, dependiendo a su vez de la distribución de los usuarios a la entrada del tramo.

En la Figura 98 derecha se muestran los valores de los adelantamientos medios que ha realizado cada vehículo en cada uno de los tres escenarios, y los intervalos de Fisher correspondientes. Se observa que el número promedio de adelantamientos realizados por vehículo ligero fue mayor al aumentar la demanda ciclista, siendo estos valores más próximos en los escenarios de demanda ciclista media y máxima.

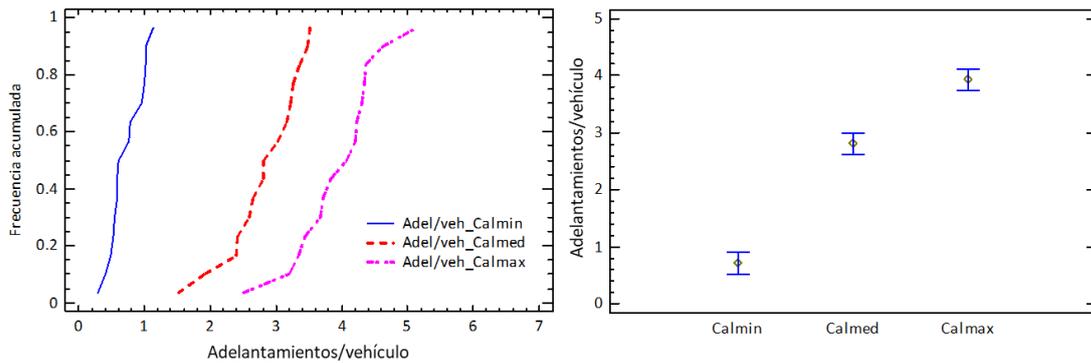


Figura 98. Distribuciones de los adelantamientos realizados por vehículo (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-310.

Otra variable que presenta una variación entre los escenarios de tráfico observados fue el tiempo de demora que experimentaron los vehículos ligeros durante su recorrido del tramo. En la Figura 99 se observan las distribuciones de la demora de los vehículos ligeros obtenidas para cada escenario de tráfico observado, representando en cada uno de ellos los valores obtenidos en las replicaciones. El tiempo de demora de los ligeros aumentó a medida que se incrementó la demanda ciclista. Al igual que ocurrió con el número de adelantamientos realizados por vehículo, para los escenarios con demandas ciclistas media y máxima la dispersión de la demora entre las replicaciones fue mayor debido a la dependencia de esta variable del número específico de ciclistas con los que cada vehículo debe de interactuar. Los valores promedio y los intervalos de Fisher se muestran en la Figura 99 derecha, donde se observa el aumento del tiempo de demora al aumentar la demanda ciclista en los escenarios de tráfico simulados.

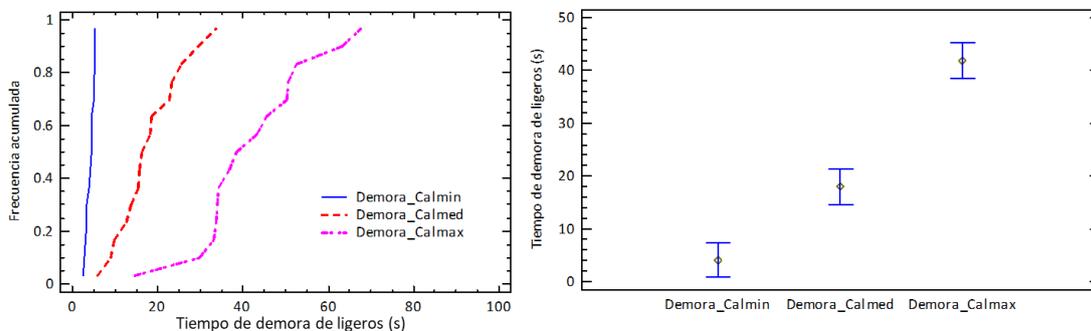


Figura 99. Distribuciones de las demoras acumuladas (izquierda) y media e intervalos LSD de Fisher (derecha) obtenidos en las simulaciones de los escenarios observados para los grupos circulando en línea y en paralelo en la CV-310.

Finalmente se calculó el porcentaje de usuarios en cola en la entrada y salida del tramo mediante las simulaciones de los tres escenarios observados. Para este cálculo se consideraron todos los usuarios presentes en la carretera, y se utilizó el umbral de 3 segundos para determinar si un usuario circulaba en cola del precedente.

En la Tabla 53 se muestran los valores obtenidos para cada escenario y para cada extremo del tramo. Se observa como en la salida del tramo el porcentaje de usuarios en cola es mayor a medida que aumenta la demanda ciclista en los escenarios simulados. Para los escenarios Calmed y Calmax los valores obtenidos fueron muy similares, debido a las características de este

tramo, en el que no resulta complicado adelantar a los diferentes grupos de ciclistas en el rango de niveles de tráfico observados.

Escenario	Inicio del tramo	Fin del tramo
	%VC Sim.	%VC Sim.
Calmin	15.00%	26.00%
Calmed	21.00%	36.00%
Calmax	19.00%	37.00%

Tabla 53. Resultados estadísticos de las simulaciones para el porcentaje de vehículos en cola (%VC) en los escenarios observados de la CV-310.

5.2.3.1.3 Resumen de las simulaciones de los escenarios de tráfico observados

A partir de las observaciones realizadas en campo se han obtenido una serie de escenarios de tráfico considerando bicicletas y vehículos motorizados en un sentido de circulación y los correspondientes vehículos motorizados en sentido opuesto. Las bicicletas en sentido opuesto no se han tenido en cuenta ya que crearían una limitación importante a la hora de realizar adelantamientos que no se corresponde con la realidad, aun así, se han considerado los escenarios de tráfico observados en los que el volumen de bicicletas en sentido opuesto es mínimo o nulo para conseguir un mayor paralelismo con las observaciones.

Los escenarios de tráfico observados correspondientes a la demanda mínima, media y máxima de ciclistas observadas fueron simulados. Estos tres escenarios tuvieron una demanda de vehículos motorizados ligeros similar, siendo la diferencia más significativa entre ellos la demanda ciclista, permitiendo caracterizar la afección sobre la funcionalidad del tráfico teniendo en cuenta esta variable.

El estudio se realizó utilizando los modelos debidamente calibrados y validados para los tramos de estudio de las carreteras CV-502 y CV-310. El uso del modelo de microsimulación del tráfico permite obtener medidas de desempeño difícilmente medibles en campo, como el tiempo de demora de los vehículos ligeros.

Los resultados obtenidos en los dos tramos de estudio han aportado las mismas conclusiones. Se confirma la afección sobre la velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros, decreciendo esta velocidad a medida que aumenta la demanda ciclista. El número de adelantamientos realizados por vehículo ligero también se vio incrementado a medida que aumentó la demanda ciclista, mostrando las simulaciones de escenarios con demandas ciclistas media y máxima una mayor dispersión en los resultados de las replicaciones realizadas. El tiempo de demora de los vehículos ligeros durante su recorrido del tramo aumentó al simular escenarios con demandas ciclistas mayores. Finalmente, el porcentaje de vehículos en cola a la entrada y salida de los tramos de estudio presentó unos valores más elevados para los escenarios con mayores demandas ciclistas.

5.2.3.2 Simulaciones de nuevos escenarios de tráfico

A partir de las simulaciones de los escenarios observados relativos a las demandas mínima, media y máxima (Calmin, Calmed y Calmax) observadas en los dos tramos de estudio se obtuvieron unas conclusiones iniciales sobre la afección a la funcionalidad del tráfico de la presencia de ciclistas en la carretera. Sin embargo, el rango de escenarios de tráfico obtenidos en campo no cubre todas las situaciones posibles que se pueden dar en la realidad.

Para poder analizar la afección sobre la funcionalidad del tráfico que supone la variación del tráfico ciclista y motorizado se han diseñado unos escenarios de tráfico que consideran

aumentos progresivos de los volúmenes tanto de ciclistas como de vehículos motorizados (según se ha explicado en el apartado 3.2.5.2 de la metodología).

5.2.3.2.1 Diseño de nuevos escenarios de tráfico

Se han diseñado una batería de escenarios de tráfico para cada una de las carreteras estudiadas. Estos escenarios diseñados se basan en las observaciones realizadas particularmente en cada tramo. Exactamente se basan en el escenario de demanda máxima de ciclistas observada en las tomas de datos de campo (Calmax), y en la información disponible en el Libro de Aforos de la Diputació de València (Diputació de València, 2019) correspondiente a cada tramo de carretera. El estudio se ha llevado a cabo para cada tramo de estudio independientemente, ajustando el diseño de escenarios de tráfico a las características particulares de cada carretera.

5.2.3.2.1.1 Diseño de escenarios para la CV-502

Durante la toma de datos en campo se calculó la intensidad equivalente horaria de vehículos motorizados a partir de las observaciones cada 15 minutos, y mediante el método de la ventana deslizante cada 5 minutos. Para el diseño de escenarios se parte del escenario de demanda máxima de ciclistas observado en este tramo de estudio, por tanto, la demanda de vehículos motorizado 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, 2019), donde se observó un aumento significativo del volumen de tráfico de vehículos motorizados en el tramo de la CV-502 durante el verano, siendo este aumento del 273%. 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 demanda de ligeros observada correspondiente al escenario M1.

Finalmente se diseñó un tercer escenario de tráfico de vehículos motorizados M3 correspondiente al doble del escenario M2 de verano. Este escenario representa una situación hipotética donde la carretera llega a congestión, y que puede que en algunos momentos se pueda llegar a observar.

Los escenarios de tráfico motorizado diseñados para la realización de este estudio de simulación se muestran en la Tabla 54.

	M1	M2	M3
Sentido de estudio	120 veh/h	327 veh/h	700 veh/h
Sentido opuesto	152 veh/h	415 veh/h	800 veh/h

Tabla 54. Diseño de escenarios de tráfico de vehículos motorizados (usuarios/h) para la CV-502.

En las observaciones realizadas en el tramo de estudio de la CV-502 se obtuvieron escenarios de demanda ciclista, obteniéndose la intensidad horaria equivalente a partir de observaciones de 15 minutos, según recomienda el HCM 2016. 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.

Los escenarios varían desde 0%, donde no circula ningún ciclista, hasta 500%, donde se ha considerado 5 veces la demanda máxima observada de ciclistas. 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 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 55. El escenario del 100% corresponde exactamente con Calmax. El número total de ciclistas en estos escenarios varió entre ningún ciclista y 960 ciclistas/hora, cubriendo así un rango suficiente de demanda ciclista que permita analizar la evolución de las diferentes medidas de desempeño a medida que aumenta el tráfico ciclista.

%Calmax	0%	50%	100%	150%	200%	250%	300%	350%	400%	450%	500%
1 ciclista	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
2 ciclistas	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
4 ciclistas	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
10 ciclistas	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Total bicicletas/hora	0	96	192	288	384	480	576	672	768	864	960

Tabla 55. 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 55 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.

A partir de la combinación de los tres escenarios de tráfico motorizado con los once escenarios de tráfico ciclista se obtuvieron un total de 66 escenarios de tráfico a simular para realizar el estudio de microsimulación del tráfico. En cada uno de estos escenarios se realizaron 15 replicaciones con el fin de reducir la variabilidad de los resultados ligada a la aleatoriedad generada en cada replicación del microsimulador. De esta manera, el número final de replicaciones simuladas para este tramo de estudio ascendió a 990.

5.2.3.2.1.2 Diseño de escenarios para la CV-310

Para realizar el diseño de escenarios de tráfico para realizar el estudio de microsimulación se partió del escenario de demanda ciclista máxima observada en el tramo de carretera.

Al igual que en el diseño de escenarios para el tramo de la CV-502, el escenario de tráfico motorizado M1 coincidió con los valores observados en el escenario Calmax.

Para el diseño del escenario de tráfico motorizado M2 se revisó la información disponible en el Libro de Aforos de la Diputació de València (Diputació de València, 2019), donde no se apreció un aumento de la demanda motorizada significativo en ninguna estación del año. Sin embargo, los valores de la intensidad media diaria de vehículos motorizado en este tramo mostrados en el Libro de Aforos indicaron unos valores mayores a los observados durante la toma de datos. Esto se debió a que la toma de datos en este tramo fue realizada un sábado por la mañana, que es cuando más ciclistas se esperaba observar en el tramo, no obstante, la demanda de vehículos motorizados en ese periodo fue algo menor de la mostrada en el Libro de Aforos. Por tanto, el escenario diseñado de vehículos motorizados M2 corresponde con la intensidad media diaria recogida en el Libro de Aforos de 2019, que corresponde a su vez con una intensidad normal de

tráfico. Se ha guardado la proporción entre vehículos en la dirección de estudio y opuestos obtenida en las observaciones.

Al igual que en el diseño de escenarios del tramo de la CV-502, para este tramo el escenario de vehículos motorizados M3 correspondió con el doble del escenario M2, obteniendo así un escenario de tráfico motorizado mucho más elevado del que habría en una situación normal, analizando el efecto que esto supone en las medidas de desempeño.

La Tabla 56 muestra los tres escenarios de tráfico motorizado diseñados para realizar el estudio de simulación del tráfico en el tramo de la carretera CV-310.

	M1	M2	M3
Sentido de estudio	156 veh/h	272 veh/h	544 veh/h
Sentido opuesto	128 veh/h	223 veh/h	446 veh/h

Tabla 56. Diseño de escenarios de tráfico de vehículos motorizados (usuarios/h) para la CV-310.

Los escenarios de ciclistas a simular se basaron en el escenario correspondiente a la máxima demanda ciclista observada en el tramo durante el periodo de toma de datos. Al igual que en el tramo anterior, se diseñaron once escenarios basados en esta demanda máxima observada considerando desde el 0% hasta el 500% con saltos cada 50%. La Tabla 57 muestra los escenarios de demanda ciclista diseñados para la realización del estudio de microsimulación del tráfico en el tramo de carretera de la CV-310.

%Calmax	0%	50%	100%	150%	200%	250%	300%	350%	400%	450%	500%
1 ciclista	0	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
2 ciclistas	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4 ciclistas	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
10 ciclistas	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
Total bicicletas/hora	0	104	208	312	416	520	624	728	832	936	1040

Tabla 57. Diseño de escenarios de tráfico de grupos de ciclistas basado en el escenario de demanda máxima ciclista observada (usuarios/h) para la CV-310.

Para tener en cuenta el efecto sobre la funcionalidad del tráfico de la configuración en línea o en paralelo en la que circulan los grupos de ciclistas se consideraron dos series de simulaciones, en cada una de ellas se dispusieron todos los grupos circulando en línea y en paralelo. Así se diseñaron en total 66 escenarios de tráfico, resultado de combinar los tres escenarios de motorizados con los once de bicicletas. Se realizaron 15 replicaciones de cada escenario, resultando en un total de 990 replicaciones a simular en el microsimulador de tráfico para este tramo de estudio.

5.2.3.2.2 Caracterización de medidas de desempeño

En este apartado se muestran los valores de las medidas de desempeño obtenidos en las simulaciones de cada escenario para los dos tramos de estudio. Las medidas que se analizan son: la velocidad media de recorrido del tramo de los ligeros (km/h), el tiempo de demora por vehículo ligero (s), el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de viaje sin bicicletas, el porcentaje del tiempo de demora respecto del tiempo de viaje, el porcentaje de usuarios en cola a la salida del tramo, el porcentaje de ligeros en cola a la salida del tramo y la densidad de ligeros seguidores a la salida del tramo.

Para su análisis se han elaborado diversos gráficos en los que se representa cada medida de desempeño respecto a la demanda ciclista. Esta demanda ciclista se ha calculado a partir de la máxima demanda ciclista observada en el tramo (ver Tabla 29 y Tabla 42), y haciendo variaciones

de desde 0% donde no hay ciclistas, hasta el 500% que es 5 veces la demanda máxima observada en campo, el 100% corresponde a la demanda máxima observada de bicicletas (según se ha explicado en el apartado 4.2.5.2 de la metodología).

En cada uno de estos gráficos se representan 6 líneas que corresponden con los escenarios diseñados de vehículos motorizados M1, M2 y M3 y con las configuraciones en paralelo (P) o en línea (L) de los grupos de ciclistas. Los escenarios de vehículos motorizados se representan en verde los correspondientes al M1, en azul los del M2 y en naranja los del M3. Las configuraciones de los grupos de ciclistas en paralelo se representan con un círculo, mientras que los escenarios en los que los grupos ha circulado en línea se representan con un triángulo.

Los resultados se presentan conjuntamente para los dos tramos de estudio, correspondiendo el gráfico de la izquierda con el tramo de la carretera CV-502 y el de la derecha con el de la CV-310.

5.2.3.2.2.1 Velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados

La primera medida de desempeño analizada es la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros en km/h (Figura 100).

Se observa como en los tres escenarios de motorizados, cuando no circulan bicicletas en el tramo, al aumentar la demanda de motorizados la velocidad media de recorrido de los ligeros disminuye ligeramente. A medida que se va aumentando la demanda de bicicletas la disminución de la velocidad media de recorrido es más acusada en los tres escenarios de motorizados.

Esto ocurre en los dos tramos en los que se ha desarrollado el estudio, en la CV-502 y en la CV-310. Sin embargo, en la CV-502 el efecto es más acusado debido a las mayores duraciones requeridas para adelantar a los grupos de ciclistas, a la menor velocidad límite en este tramo y a la sección más desfavorable.

Se observa como existe una demanda ciclista a partir de la cual el efecto de un aumento de ciclistas afecta relativamente poco a la velocidad media de recorrido del tramo de los ligeros.

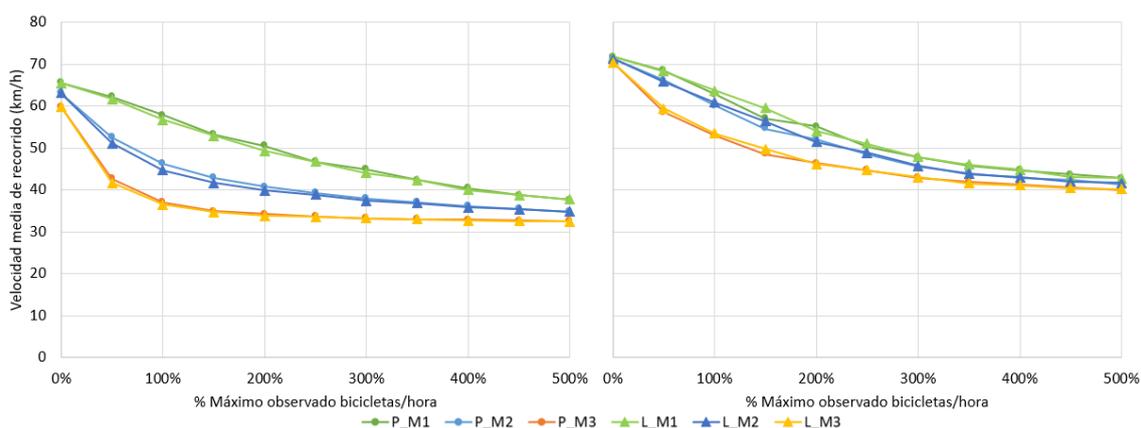


Figura 100. Velocidad media de recorrido de vehículos ligeros (km/h) resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310. La disposición de los grupos de ciclistas es P (paralelo), L (línea), mientras que los escenarios de tráfico motorizados corresponden con M1, M2 y M3.

Para la CV-502, el escenario con menor demanda de motorizados (M1) corresponde con las dos líneas superiores del gráfico representadas en verde; se observa como al aumentar la demanda ciclista la velocidad disminuye con una tasa de reducción más o menos constante. El escenario

de demanda de motorizados correspondiente al verano (M2) está representado por las líneas centrales del gráfico, se puede ver como para esta demanda de motorizados la velocidad media de recorrido es más sensible a la presencia de ciclistas, decreciendo más rápidamente al considerar demandas menores de ciclistas y decreciendo más lentamente a partir de 150% de la demanda máxima observada de ciclistas. Las dos líneas inferiores del gráfico corresponden a la demanda máxima de motorizados simulada (M3). En este caso se aprecia que un porcentaje bajo de ciclistas (50% de la demanda máxima observada) tiene un efecto sobre la velocidad media de recorrido elevado, causando una reducción cercana a los 20 km/h, y a partir del 100% de la demanda máxima observada de bicicletas la afección sobre la velocidad se estabiliza alrededor de los 35 km/h, es decir, que la velocidad media de recorrido de los ligeros es similar a la de las bicicletas.

Para los resultados de la CV-310, mostrados en la Figura 100 derecha, se observa que para los escenarios de tráfico M1, correspondientes a las dos líneas superiores del gráfico, la velocidad media de recorrido de los ligeros disminuye a un ritmo constante al aumentar la demanda ciclista hasta alrededor del 350%, a partir de este valor la reducción es menor. Las líneas que representan el escenario de motorizados M2, mostradas en el centro del gráfico, muestran la misma tendencia que las correspondientes a los escenarios de M1. En este caso, al incorporar un número más elevado de vehículos motorizados, la velocidad media de recorrido es menor en todos los escenarios en los que se han introducido ciclistas respecto de la M1. En los dos escenarios relativos al tráfico motorizado M3 se observa una reducción de la velocidad media de recorrido más pronunciada en los primeros escenarios de demanda ciclistas, hasta el 200%, a partir de este punto un aumento en la demanda ciclista conlleva una reducción de la velocidad media de recorrido de los motorizados menos acusada. Para el escenario de demanda máxima de bicicletas simulado correspondiente al 500% la velocidad media de recorrido de los ligeros se aproxima a los 40 km/h en los tres escenarios de motorizados, resultando cercana a la velocidad media de las bicicletas que en este tramo es de 34 km/h.

En general, se aprecia una disminución de la velocidad media de recorrido a medida que la demanda ciclista aumenta, siendo esta disminución más sensible cuando en el tramo hay un tráfico mayor de motorizados. La reducción de la velocidad media de recorrido de los motorizados es más acusada en el tramo de la CV-502, seguramente debido a la mayor duración de los adelantamientos y a la menor velocidad límite de este tramo.

5.2.3.2.2.2 Tiempo de demora de los vehículos motorizados

La segunda medida de desempeño analizada en este estudio es el tiempo de demora de los vehículos ligeros al recorrer el tramo (Figura 101). Se calcula como la diferencia entre el tiempo de recorrido del tramo esperado en condiciones ideales y el tiempo de recorrido real. Se presenta el valor medio de todos los vehículos motorizados participantes en cada escenario.

Para la CV-502, correspondiente al gráfico de la izquierda, cuando no circulan ciclistas por el tramo los valores del tiempo de demora por vehículo motorizado son de 1.24 s para el nivel de motorizados M1, 5.57 s para M2 y 12.07 s para M3. El tiempo medio de recorrido del tramo de los vehículos ligeros cuando no circulan bicicletas por el tramo es de 121 s en el escenario de tráfico motorizado M1, de 126 s en M2 y de 132 s en M3.

Para la CV-310, correspondiente al gráfico de la derecha, en los escenarios donde no existen ciclistas los tiempos de demora por vehículo motorizado toman los valores de 2.51 s para M1, 3.91 s para M2 y 7.00 s para M3. Cuando no circulan ciclistas por el tramo el tiempo medio de

recorrido de este por los vehículos a motor es de 244.46 s para M1, 245.81 s para M2 y 249.02 s para M3.

El tramo correspondiente a la CV-310 tiene una longitud mayor que el de la CV-502, por tanto, el tiempo medio de recorrido también lo es, a pesar de tener una velocidad límite superior. En ambos tramos de estudio se observa un aumento del tiempo de demora de los vehículos motorizados al aumentar tanto el tráfico motorizado como el ciclista.

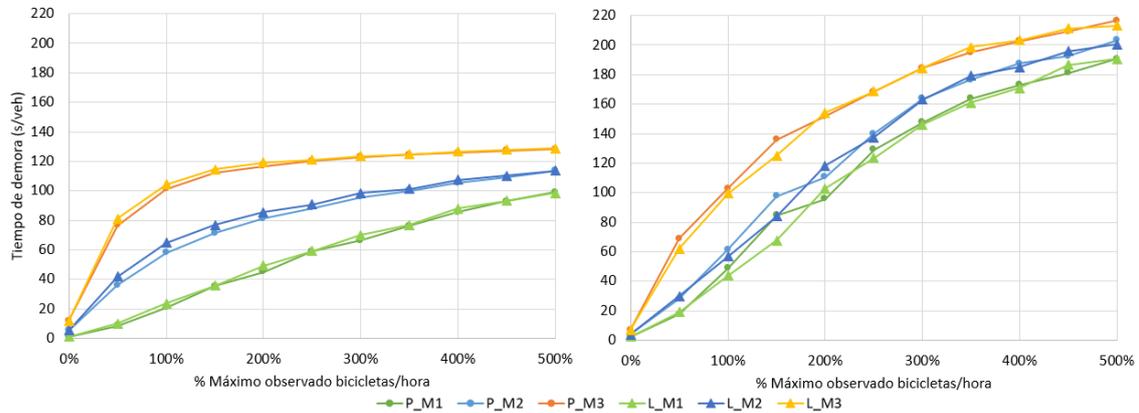


Figura 101. Tiempo de demora de vehículos ligeros (s/veh) resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.

Para el tramo de la CV-502, correspondiente al gráfico de la izquierda, en el nivel de tráfico motorizado M1, correspondiente a las dos líneas inferiores del gráfico, se puede observar como la demora va creciendo a medida que se introducen más bicicletas en el tramo. La relación entre estas dos variables es prácticamente una recta, indicando que la tasa de variación media es constante. Para el escenario de motorizados M2, correspondiente a las líneas centrales del gráfico, la demora crece rápidamente en los primeros escenarios de bicicletas hasta alrededor del 150%, después la tasa de variación es menor. En el tercer escenario de motorizados (M3) la demora crece muy rápido en los primeros escenarios de bicicletas, y a partir del 150% de la demanda máxima ciclista se estabiliza en torno a los 120 segundos, suponiendo un valor cercano al del recorrido del tramo sin bicicletas. Esto indica que al aumentar el nivel de tráfico motorizado en el tramo la demora de los motorizados es más sensible a la presencia de bicicletas, llegando a valores máximos aun cuando la presencia de ciclistas no es elevada.

El gráfico de la derecha corresponde al tramo de la CV-310. En él se observa como el tiempo de demora de los vehículos motorizados aumenta a medida que lo hace el volumen de ciclistas en los tres escenarios de motorizados. Sin embargo, los valores alcanzados no presentan una estabilización como ocurre en el otro tramo de carretera, indicando que este tramo puede soportar una demanda mayor de bicicletas, aunque en los últimos escenarios de demanda ciclista simulados la tasa de crecimiento es menor. Para el tramo de la CV-310 los valores entre línea y paralelo presentan algunos puntos fuera de la tendencia general de estas líneas debido a las características de este tramo, que permite realizar más adelantamientos.

5.2.3.2.2.3 Porcentaje del tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo de los motorizados cuando no existen ciclistas

Esta medida de desempeño representa el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo cuando el volumen de ciclistas en nulo. Representa mejor la afeción de

la presencia ciclista sobre los tiempos de recorrido del tramo que la demora en sí, ya que es adimensional, y permite la comparación de escenarios entre sí.

En general esta medida de desempeño aumenta a medida que se incrementa el volumen de ciclistas en el tramo (Figura 102), su variación es similar a la del tiempo de demora mostrado en la Figura 101.

Las variaciones para cada nivel de tráfico motorizado son las mismas que el tiempo de demora. Para el tramo de la CV-502 (Figura 102 izquierda) cuando el tráfico motorizado es mayor en el tramo (M3) esta variable es más sensible a la presencia de bicicletas, aumentando considerablemente en los primeros escenarios de demandas más bajas de ciclistas, llegando a un punto de estabilización alrededor del 90%, indicando que un 90% del tiempo de recorrido el vehículo ha circulado a velocidades menores de las deseadas. En el tramo de la CV-310 (Figura 102 derecha), esta variable aumenta al aumentar el número de ciclistas, llegando a valores cercanos al 80%.

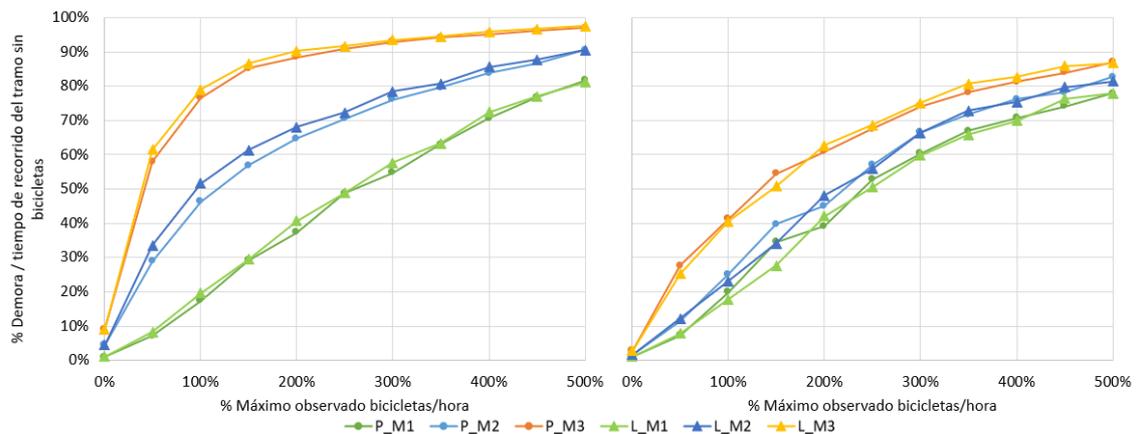


Figura 102. Porcentaje del tiempo de demora entre el tiempo de recorrido del tramo de los vehículos ligeros cuando no circulan ciclistas resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.

5.2.3.2.2.4 Porcentaje del tiempo de demora entre el tiempo de recorrido del tramo de los motorizados

Esta variable representa el tiempo de demora de los vehículos motorizados respecto del tiempo de recorrido medio del tramo para cada escenario simulado. Representa el porcentaje de tiempo en el que un vehículo sufre demora respecto el tiempo total que ha invertido en recorrer el tramo en las condiciones de cada escenario.

La Figura 103 muestra los valores de esta variable para los dos tramos de carretera estudiados y su evolución al aumentar el tráfico motorizado y el tráfico ciclista. Para los dos tramos el porcentaje de demora entre el tiempo de recorrido del tramo aumenta al aumentar el tráfico motorizado y el ciclista, hasta llegar a un nivel de tráfico en el que se estabiliza.

El gráfico de la izquierda corresponde con los valores obtenidos en la CV-502. Las dos líneas inferiores representan los escenarios en línea y en paralelo para el nivel de tráfico M1, se observa un aumento gradual del porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido a medida que se incorporan más ciclistas en el tramo. Para el nivel de tráfico motorizado M2, correspondiente a las dos líneas centrales del gráfico. El porcentaje de demora crece rápidamente al incorporar pocas bicis en el tramo hasta el escenario de demanda ciclista del 150%, a partir de ahí el efecto del aumento de la demanda ciclista sobre esta variable es

menor. Este mismo efecto se observa para el nivel de tráfico motorizado M3, mostrado en las dos líneas superiores del gráfico. La introducción del primer escenario que incluye ciclistas, correspondiente al 50% del máximo observado, aumenta el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido en un 30%, siendo el escenario con la mayor demanda de motorizados M3 el más sensible a la introducción de ciclistas, estabilizándose a partir del 150% de ciclistas en un valor cercano al 50%.

La Figura 103 derecha muestra la evolución del porcentaje de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo para el tramo de carretera de la CV-310. En este caso se observa para los niveles de tráfico M1 y M2 un efecto similar del aumento de la demanda ciclista sobre esta variable, aumentando más rápidamente para los escenarios con menores demandas ciclistas y reduciéndose la tasa de crecimiento a partir de alrededor del escenario del 250% de la demanda ciclista máxima observada. Para el escenario de motorizados M3, la introducción de ciclistas en el tramo, correspondiente a los escenarios menos cargados de ciclistas, supuso un aumento más acusado del porcentaje de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo, siendo este efecto para escenarios con tráfico elevado de ciclistas menor.

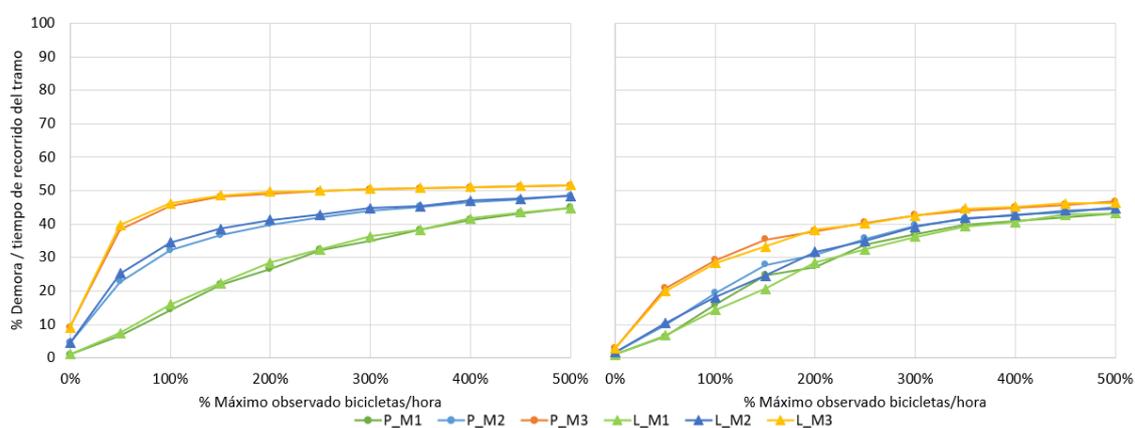


Figura 103. Porcentaje del tiempo de demora entre el tiempo de recorrido del tramo de los vehículos ligeros resultados de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.

En ambos tramos de estudio el porcentaje de tiempo de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo de los ligeros se estabiliza alrededor del 50% cuando se simula el escenario de demanda máxima de bicicletas. Esto supone que los conductores experimentan una demora durante la mitad del tiempo invertido en recorrer el tramo.

5.2.3.2.2.5 Adelantamientos realizados por vehículo motorizado

Una medida de desempeño importante en las carreteras convencionales es el número de adelantamientos que realiza un vehículo durante su recorrido por el tramo. El número de adelantamientos realizados depende de la demanda, es decir, de la necesidad de adelantar, y de la oferta, o la posibilidad de adelantar.

La evolución del número de adelantamientos realizados por vehículo presenta unos valores diferentes según el tráfico motorizado que exista en cada escenario. Generalmente al aumentar el tráfico motorizado existen menos huecos en el sentido opuesto, y por tanto la oferta de adelantamiento disminuye (Figura 104).

Para el tramo de la CV-502, correspondiente al gráfico de la izquierda, las dos líneas superiores del gráfico representan los escenarios con menor tráfico de motorizados (M1), en ellas se

aprecia como el número de adelantamientos realizados va creciendo a medida que aumenta la demanda ciclista hasta llegar a una demanda donde los adelantamientos disminuyen. El valor de la demanda ciclista a partir de la que los adelantamientos son menores está en torno al 300% de la máxima observada. En este punto la elevada presencia de ciclistas en el tramo dificulta la realización de maniobras de adelantamiento, y demandas ciclistas mayores suponen menos adelantamientos. Para los escenarios un tráfico motorizado M2, correspondientes a las dos líneas centrales del gráfico, el número de adelantamientos es menor que los observados en el M1, aun así, los adelantamientos crecen a medida que aumenta el volumen ciclista en el tramo hasta llegar a un valor cercano al 200% de la demanda máxima de ciclistas donde el número de adelantamientos se estabiliza. En el escenario de máxima demanda de motorizados M3, correspondiente a las dos líneas inferiores del gráfico, el número de adelantamientos registrados crece hasta el valor alrededor del 200% de demanda ciclista, y a partir de ahí se estabiliza, siendo muy menor a los escenarios M2 y M1.

El gráfico de la derecha representa los resultados obtenidos para el tramo de la CV-310. En este caso se observa un comportamiento similar al del tramo de la CV-502, pero en este caso el número de adelantamientos por vehículo motorizado es más elevado debido a la mayor longitud del tramo que permite la interacción de cada vehículo motorizado con un mayor número de ciclistas. También influye el hecho de que en este tramo las duraciones requeridas para realizar los adelantamientos a ciclistas son menores que en la CV-502, facilitando la realización de adelantamientos. Se observa como en los tres escenarios de motorizados existe una demanda ciclista en la que se maximiza el número de adelantamientos, a partir de la cual los adelantamientos decrecen. Esta demanda ciclista se encuentra alrededor del 200% en los tres escenarios de motorizados. Al igual que en el otro tramo de carretera, al aumentar la demanda de motorizados el número de adelantamientos decrece debido a la menor disposición de huecos en el sentido opuesto.

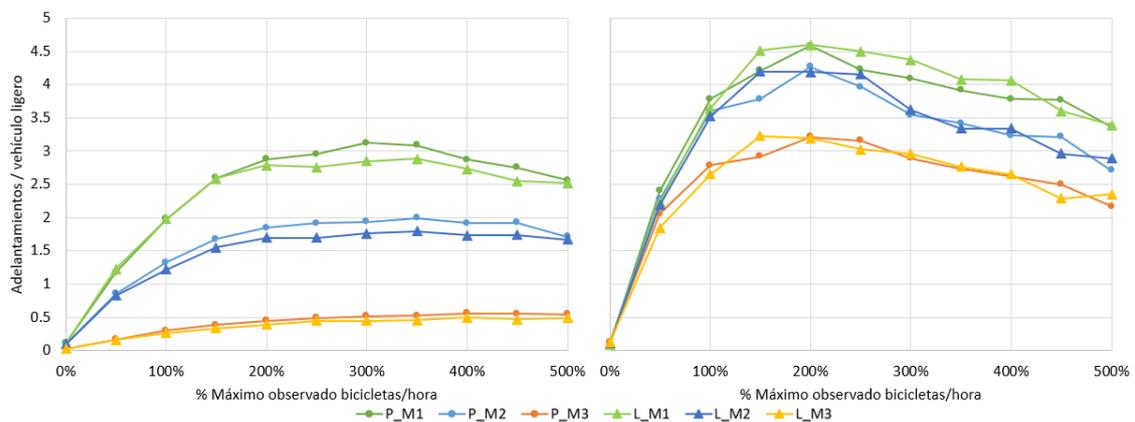


Figura 104. Adelantamientos realizados por vehículo ligero resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.

5.2.3.2.2.6 Porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo considerando a todos los usuarios

El porcentaje de vehículos en cola se calcula en la salida del tramo considerando que un usuario circula en cola cuando el intervalo de tiempo entre este y su predecesor es menor de 2.5 segundos, tal y como recomienda el estudio del TRB del 2018.

En la Figura 105 se muestra la evolución del porcentaje de usuarios en cola considerando todos los usuarios de la vía, es decir, vehículos motorizados y bicicletas.

Para el tramo de la CV-502, cuando no existe tráfico ciclista en el tramo el porcentaje de usuarios en cola aumenta a medida que se incrementa el tráfico motorizado, pasando de un 14% para el escenario de motorizados M1 a un 40% en el M2 y un 67% en el M3. Al introducir tráfico ciclista el porcentaje de usuarios en cola aumenta, siguiendo una evolución diferente según el escenario de tráfico motorizado considerado. En el escenario de tráfico motorizado M1 el porcentaje de usuarios en cola aumenta de forma prácticamente lineal al incrementarse el tráfico ciclista en el tramo, pasando del 10% cuando no circulan ciclistas a alrededor del 40% cuando se alcanza el máximo escenario de ciclistas. En los escenarios de tráfico motorizado M2 y M3 la evolución del porcentaje de usuarios en cola es similar, aumentando rápidamente en los escenarios con la demanda ciclista más baja hasta llegar a un punto, alrededor del 150% de la demanda ciclista donde se estabiliza para M2 o incluso decrece para M3. Este decrecimiento observado en los escenarios de tráfico motorizado M3 se explica porque las bicicletas no circulan en cola, ya que su velocidad es menor que los motorizados, pero debido a la elevada intensidad de motorizados y bicicletas los adelantamientos se reducen, provocando que la mayoría de motorizados circulen en cola detrás de las bicicletas. Al considerar a todos los usuarios en el cálculo del porcentaje de vehículos en cola se subestima el número de vehículos motorizados que circulan en cola.

Para el tramo de la CV-310, correspondiente al gráfico de la derecha, al aumentar el tráfico motorizado el porcentaje de usuarios en cola es mayor. Los valores del porcentaje de vehículos en cola para los escenarios en los que no hay ciclistas son del 25% para el M1, del 36% para el M2 y del 55% para el M3. A medida que aumenta el tráfico ciclista el porcentaje de usuarios en cola va aumentando hasta llegar a una demanda ciclista a partir de la cual se estabiliza. El valor de esta demanda ciclista está alrededor del 200%, presentando valores del porcentaje de usuarios en cola a la salida del tramo cercanos al 55% para el M1, al 63% para el M2 y al 75% para el M3. En estos puntos de demandas ciclistas elevadas el número de adelantamientos se va reduciendo, y los usuarios llegan a la salida del tramo en cola de las bicicletas, las cuales representan un obstáculo para los motorizados debido a su menor velocidad.

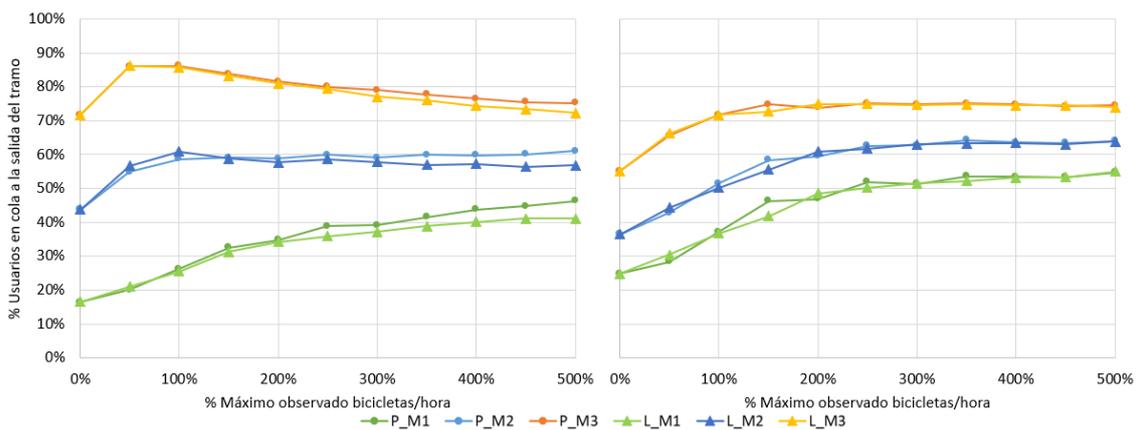


Figura 105. Porcentaje de usuarios en cola a la salida del tramo ligero resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.

5.2.3.2.2.7 Porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo considerando sólo a los vehículos motorizados

En la Figura 106 se muestra la evolución del porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo considerando solamente a los vehículos motorizados y un umbral de tiempo de 2.5 segundos. En el cálculo de los vehículos que circulan en cola se considera a todos los usuarios, pero el resultado solamente considera a los motorizados, es decir, no se consideran las bicicletas que circulan en cola o no, pero los motorizados que circulan en cola de una bicicleta sí se consideran.

Esta medida de desempeño calculada considerando solamente a los vehículos motorizados resulta más realista que considerar a las bicicletas también, ya que la mayoría de bicicletas no circula en cola, y lo que hace es reducir el porcentaje de usuarios en cola. Los valores para los tres escenarios de motorizados sin bicicletas son iguales que en la Figura 105, sin embargo, al introducir a ciclistas en el tramo e ir aumentando su demanda la evolución del porcentaje de vehículos en cola aumenta, pero de manera diferente.

Para el tramo de la CV-502, los escenarios correspondientes al nivel de tráfico más bajo M1 están representados por las dos líneas inferiores del gráfico. En ellos se observa que el porcentaje de vehículos en cola aumenta linealmente a medida que se incrementa el tráfico ciclista en el tramo, este aumento es más pronunciado hasta alrededor del escenario con el 200% del máximo de ciclistas observado, a partir de aquí la pendiente es ligeramente menor llegando a alcanzar entre el 70% y el 77% según la configuración de los grupos de ciclistas. Los escenarios de motorizados M2 corresponden con las dos líneas centrales del gráfico. En ellos se observa como el porcentaje de vehículos en cola aumenta rápidamente al simular los primeros escenarios de ciclistas y luego se estabiliza alrededor del 80% a partir del escenario de tráfico ciclista del 250%. Para el escenario de motorizados M3 la presencia de pocos ciclistas provoca un aumento del porcentaje de vehículos en cola elevado, estabilizándose a partir del 100% del escenario de bicicletas máximas observado alrededor del valor del 90%.

Para el tramo de la CV-310, correspondiente a la Figura 106 derecha, el porcentaje de vehículos motorizados que circulan en cola a la salida del tramo presenta una evolución similar al aumentar el tráfico ciclista en los tres escenarios de tráfico motorizado simulados, aumentando más rápidamente en los escenarios con demandas ciclistas menores y alcanzando un valor estable cuando la demanda ciclista alcanza un cierto valor. Sin embargo, el valor de la demanda ciclista que estabiliza el porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo difiere según el escenario de tráfico motorizado observado. Para los escenarios correspondientes a M1, representados en las dos líneas inferiores del gráfico, se observa que el porcentaje de motorizados en cola aumenta de una manera constante hasta alcanzar el escenario de ciclistas de alrededor del 350%, a partir de este punto, un aumento en la demanda ciclista influye muy poco en el porcentaje de motorizados en cola. Para el escenario de tráfico motorizado M2, el escenario de demanda ciclista a partir del cual se estabiliza el porcentaje de motorizados en cola es un poco menor que el del M1, estando en este caso alrededor del 300%. Para el escenario de motorizados M3 el porcentaje de motorizados en cola ya parte de un valor elevado para el escenario sin ciclistas correspondiente al 54.20 %, y a partir del escenario de demanda ciclista del 200% se alcanza el valor máximo del 90% de los motorizados circulando en cola.

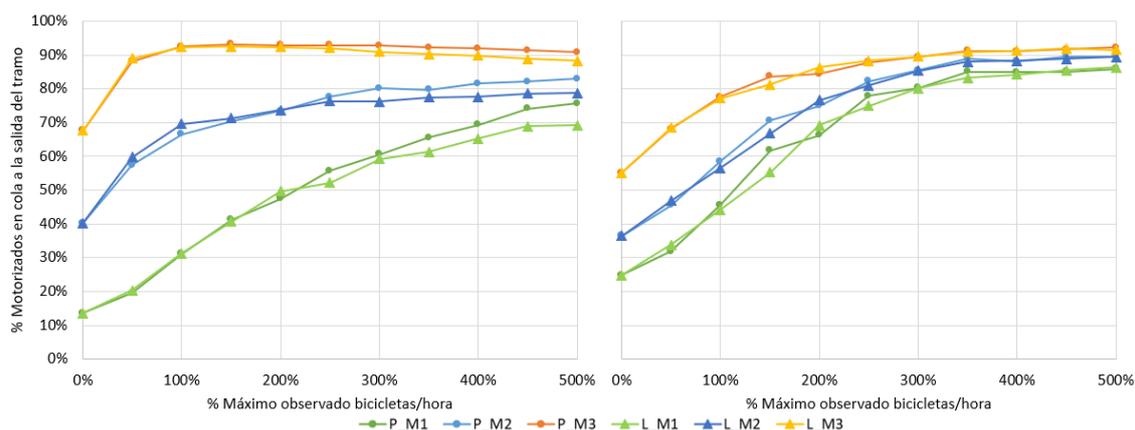


Figura 106. Porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo ligero resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.

5.2.3.2.2.8 Densidad de seguidores a la salida del tramo considerando sólo a los vehículos motorizados

Esta medida de desempeño se ha calculado siguiendo las recomendaciones del documento publicado por el Transportation Research Board (2018). En este documento se considera que esta medida de desempeño es la mejor para caracterizar el nivel de servicio en una carretera convencional, sin embargo, en su cálculo no se especifica que pueda considerar tráfico mixto de bicicletas y motorizados. Se trata de una medida de desempeño puntual, que explica el estado del tráfico en la carretera en el punto final del tramo estudiado. Para su cálculo se ha utilizado la expresión descrita en la metodología, considerando el porcentaje de vehículos en cola solamente a los vehículos ligeros, pero teniendo en cuenta a los que circulan en cola de bicicletas (Figura 106), el volumen direccional de vehículos ligeros y la velocidad puntual de estos en la salida del tramo de estudio.

En general la densidad de seguidores aumenta a medida que se incrementa el tráfico ciclista en el tramo para todos los niveles de tráfico motorizado simulados (Figura 107). También se ve incrementada al aumentar el tráfico motorizado. Para el análisis de la densidad de seguidores según al tráfico ciclista y motorizado se han utilizado los umbrales que determinan el nivel de servicio de la carretera definidos por el Transportation Research Board (2018) descritos en el apartado de la metodología (Tabla 4).

Los resultados de las simulaciones para el tramo de la CV-502 se muestran en la Figura 107 izquierda. Para los escenarios de motorizados M1, representados por las dos líneas inferiores del gráfico, la densidad de seguidores varía entre 0.37 seguidores/km/carril y 2.36 seguidores/km/carril. Para los escenarios de M1, el nivel de servicio del tramo de carretera se encuentra en un nivel A hasta el escenario de bicicletas del 200%, donde a partir de ahí se pasa al nivel de servicio B. Los escenarios relativos al nivel de tráfico M2 corresponden con las dos líneas centrales del gráfico. En ellos se observa como la densidad de seguidores aumenta al incrementarse la demanda ciclista, pero este aumento no es constante, se diferencian dos tramos. El primero va desde el escenario de 0 bicicletas hasta el del 100%, aquí la densidad de seguidores aumenta más rápidamente, pasando a encontrarse el tramo del nivel de servicio B al C. El segundo tramo para M2 engloba desde el escenario de ciclistas 100% hasta el final del 500%, aquí la pendiente es menor indicando una menor variación de la densidad de seguidores, sin embargo, se inicia con un nivel de servicio C y se alcanza el nivel D. Para los escenarios relativos al nivel de tráfico M3, correspondientes a las dos líneas superiores del gráfico, el

comportamiento de la densidad de seguidores al incrementarse la demanda ciclista es diferente, siendo mucho más sensible a la presencia de pocos ciclistas en la vía. De hecho, se observa un aumento considerable hasta el escenario del 100% de ciclistas, a partir de ahí el crecimiento es menor llegando a estabilizarse a partir del 200% de ciclistas. El escenario de tráfico motorizado M3 ya inicia sin bicicletas en el nivel de servicio D, a partir de 9.32 seguidores/km/carril se alcanza el nivel de servicio E, en el gráfico este valor es alcanzado al introducir muy pocos ciclistas en el tramo, entre los escenarios del 0% y del 50%. Por tanto, para este nivel de tráfico motorizado el nivel de servicio de la vía se considera pésimo.

Para el tramo de la CV-310, correspondiente a la Figura 106 derecha, se observa para los escenarios con nivel de tráfico motorizado M1 un aumento progresivo de la densidad de seguidores al aumentar el tráfico ciclista. De hecho, para este nivel de tráfico de motorizados, el nivel de servicio de la carretera es A cuando no circulan ciclistas, sin embargo, al ir aumentando la demanda de ciclistas se alcanza el nivel de servicio B para el escenario de demanda ciclista entre el 150% y el 200 %, llegando finalmente a un nivel de servicio C a partir del escenario del 350% de demanda ciclista. Para los escenarios correspondientes al nivel de tráfico motorizado M2, representados por las líneas centrales del gráfico, el nivel de servicio de la carretera es de A, cuando no circulan ciclistas, pasa a B en el primer escenario del 50% de demanda ciclista, se eleva hasta C en el escenario de demanda ciclista del 150% y finalmente alcanza el nivel de servicio D a partir del escenario correspondiente con la demanda ciclista del 500%. Los escenarios obtenidos en el nivel de tráfico más elevado M3 se representan en las dos líneas superiores del gráfico. Para este escenario de motorizados M3 se parte ya de un nivel de servicio C, alcanzando el nivel de servicio D antes de llegar al 100% de la demanda ciclista, y pasando al peor nivel de servicio E a partir de un escenario de demanda ciclista alrededor del 180%.

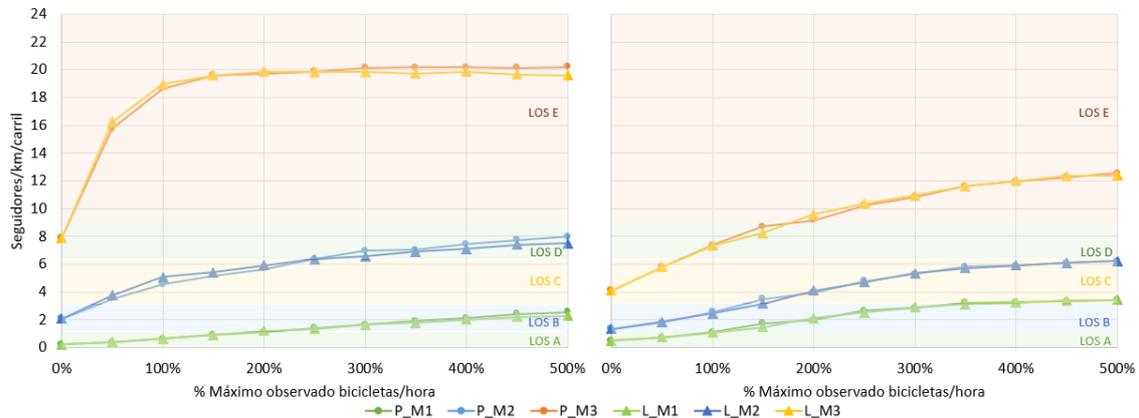


Figura 107. Densidad de seguidores a la salida del tramo considerando sólo a los vehículos motorizados resultado de las simulaciones considerando un aumento de la demanda ciclista y de vehículos motorizados. Izquierda CV-502, derecha CV-310.

En general, la presencia de ciclistas aumenta el nivel de servicio de la carretera más rápidamente cuando en la vía circulan más vehículos motorizados debido a la dificultad de realizar adelantamientos por la menor disponibilidad de huecos en el sentido opuesto.

5.2.3.2.2.9 Resumen de los resultados de caracterización de las medidas de desempeño
Para todas las medidas de desempeño estudiadas la presencia de tráfico ciclista afecta a su resultado de tal manera que al aumentar el tráfico ciclista los valores de estas medidas representan un empeoramiento de la funcionalidad del tráfico.

La afección del tráfico ciclista depende del nivel de tráfico motorizado que exista en la carretera, generalmente, cuanto mayor es el tráfico motorizado más sensibles son las medidas de desempeño a menores demandas ciclistas adquiriendo valores desfavorables más rápidamente.

El aumento de la demanda ciclista en la carretera se traduce en una reducción de la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados, en un aumento del tiempo de demora de los motorizados y en un aumento del porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo de estudio. El número de adelantamientos realizados por vehículo se incrementa al incorporar bicicletas en el tramo, llegando a un máximo para un cierto nivel de demanda ciclista a partir del cual decrece. La densidad de vehículos en seguimiento a la salida del tramo también ha sido caracterizada en este estudio, observándose un aumento de esta medida de desempeño a medida que aumenta la demanda ciclista en el tramo de carretera.

Los resultados analizados en este estudio están específicamente relacionados con los tramos de estudio simulados correspondientes a la CV-502 y a la CV-310. El tramo de la CV-502 corresponde a una carretera sin arcén, donde los ciclistas deben circular por el carril. También hay que tener en cuenta que en el tramo de estudio de la CV-502 la velocidad límite es de 70 km/h y en gran parte del tramo es de 60 km/h, por tanto, las velocidades medias de recorrido de los ligeros no se vieron reducidas en exceso. En el tramo de la CV-310 el arcén tiene un ancho de 1.5 metros y la velocidad límite es de 80 km/h.

5.3 Aplicaciones del modelo de microsimulación para la gestión de la infraestructura

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.

5.3.1 Configuración de los grupos de ciclistas

Para este estudio se han utilizado los modelos de microsimulación del tráfico calibrados y validados particularmente para los tramos de carretera de la CV-502 y de la CV-310. Se han simulado las baterías de escenarios de tráfico diseñados para cada tramo, considerando variaciones tanto en el tráfico motorizado como en el ciclista. Con los datos obtenidos de todas las replicaciones de cada escenario de tráfico simulado se ha realizado un análisis con el fin de determinar la influencia de la configuración en la que circulan los grupos de ciclistas en las medidas de desempeño utilizadas para caracterizar la funcionalidad del tráfico en cada tramo de estudio.

5.3.1.1 Tramo de la CV-502

Para comparar los valores de las medidas de desempeño entre los escenarios en los que los grupos de ciclistas circulan en línea y en paralelo primero se realizó una comparación de los valores medios de estas medidas entre los diferentes escenarios de tráfico motorizado simulados.

En la Figura 108 se muestran los valores medios y los intervalos de Fisher de cada medida de desempeño para cada uno de los tres escenarios de motorizados simulados en la CV-502. Se observa que, para todas las medidas de desempeño analizadas, las medias presentan diferencias estadísticamente significativas entre los tres escenarios de tráfico motorizado con un nivel de confianza del 95%.

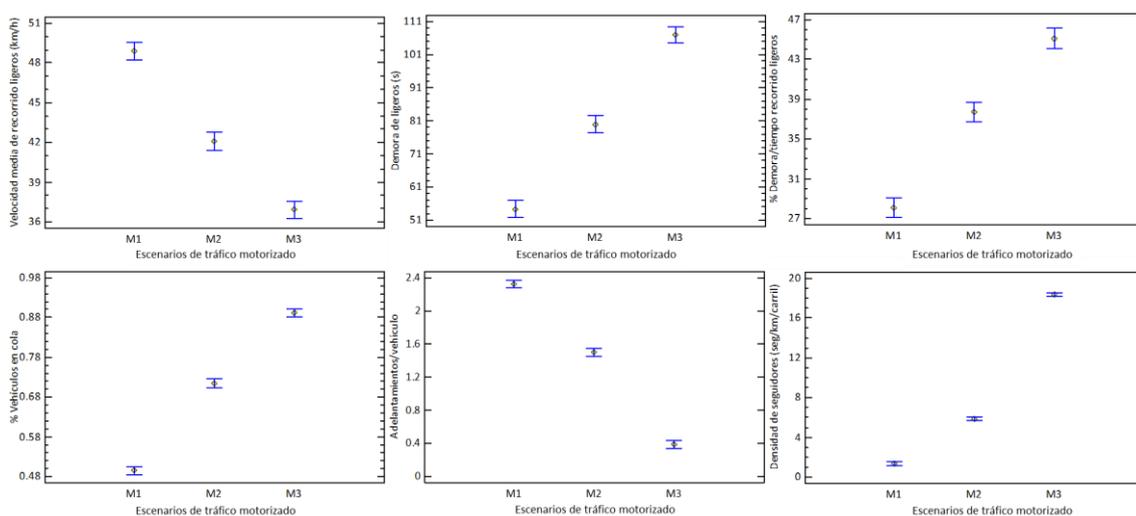


Figura 108. Medias e intervalos LSD de Fisher para las medidas de desempeño según los tres escenarios de tráfico simulados para la CV-502.

Este resultado indica que el nivel de tráfico motorizado existente en el tramo influye en los valores de las medidas de desempeño, por tanto, el análisis de las configuraciones en línea y en paralelo debe de realizarse para cada escenario de tráfico motorizado en particular.

A continuación, se realizaron pruebas ANOVA para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las medidas de desempeño considerando a los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo.

- Velocidad media de recorrido del tramo

La primera medida de desempeño analizada fue la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros. Esta variable se analizó para cada uno de los tres escenarios de tráfico motorizado, comparando los valores de las simulaciones realizadas teniendo en cuenta la configuración de los grupos de ciclistas en línea o en paralelo.

En la Tabla 58 se observan los valores estadísticos de la velocidad media de recorrido de los ligeros de las 15 replicaciones de cada uno de los 11 escenarios con diferentes demandas ciclistas, simulados para cada tipo de configuración de los grupos de ciclistas. Se han comparado las medias de la velocidad media de recorrido de los ligeros obtenidas considerando las configuraciones de los grupos en línea y en paralelo mediante una prueba ANOVA. Este proceso se ha realizado para los tres escenarios de tráfico motorizado y los resultados se muestran en la Tabla 58.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (km/h)	48.70	49.10	41.76	42.40	36.71	37.16
Desv. (km/h)	9.19	9.33	8.31	8.41	7.80	7.79
Comparación L-P ANOVA test	F=0.15 p-valor=0.698		F=0.47 p-valor=0.492		F=0.28 p-valor=0.600	
Modelo de regresión	R ² =92.87% Coef. corr.=0.97 Vmr=1/(0.015+0.002*%B)		R ² =95.26% Coef. corr.=0.98 Vmr=1/(0.016+0.006*(%B) ^{1/2})		R ² =85.83% Coef. corr.=0.93 Vmr=1/(0.019+0.006*(%B) ^{1/2})	

Tabla 58. Valores estadísticos de la velocidad media de recorrido de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.

Según se observa en la Tabla 58 los valores medios de la velocidad media de recorrido del tramo son ligeramente mayores cuando los grupos de ciclistas circulan en paralelo. Esto se debe a que cuando los ciclistas circulan en paralelo son más fáciles de adelantar, ya que se requiere una menor duración del adelantamiento, mientras que cuando circulan en línea se necesita un mayor hueco en el sentido opuesto para iniciar la maniobra. Sin embargo, los resultados mostrados en la Tabla 58 no presentan diferencias estadísticamente significativas entre las medias de la velocidad media de recorrido para las configuraciones en línea y en paralelo en ninguno de los tres escenarios de motorizados, con un nivel de significancia del 5%. Esto indica que para los escenarios simulados la configuración del grupo de ciclistas no influye en la velocidad media de recorrido de los ligeros de manera significativa.

A partir de estos resultados, se ajustó un modelo para describir la relación entre la velocidad media de recorrido de los ligeros y el tráfico ciclista presente en el tramo de carretera. Dado que los valores medios de esta medida de desempeño no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones, se ajustó el modelo considerando conjuntamente todos los datos obtenidos de las simulaciones para cada uno de los tres escenarios de motorizados. En la Tabla 58 se observan los resultados obtenidos.

Para los tres escenarios de motorizados se obtuvieron valores de R² y del coeficiente de correlación elevados, indicando el buen ajuste de estos modelos. Los valores de ajuste de los modelos fueron un poco menores para el escenario de tráfico motorizado más elevado. En los

tres escenarios de motorizados la relación entre la velocidad media de recorrido y el volumen de bicicletas en el tramo fue inversamente proporcional, siendo en los escenarios M2 y M3 la velocidad media de recorrido inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la demanda ciclista.

- Tiempo de demora

La segunda medida analizada ha sido el tiempo de demora. En la Tabla 59 se muestran los resultados estadísticos de la comparación entre las configuraciones en línea y en paralelo de las medias del tiempo de demora de los vehículos motorizados durante su recorrido del tramo. Las medias del tiempo de demora no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los escenarios considerando a los ciclistas circulando en línea y en paralelo para ninguno de los tres escenarios de tráfico motorizado. Sin embargo, los valores medios de la demora de los ligeros fueron ligeramente mayores para los escenarios donde los grupos circularon en línea.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (s)	55.07	53.70	81.52	78.56	107.65	106.14
Desv. (s)	33.00	33.25	32.17	32.64	33.29	33.35
Comparación L-P ANOVA test	F=0.14 p-valor=0.709		F=0.69 p-valor=0.408		F=0.17 p-valor=0.682	
Modelo de regresión	R ² =94.77% Coef. corr.=0.97 D=3.54+20.34*%B		R ² =95.26% Coef. corr.=0.98 D=9.18+49.06*(%B) ^{1/2}		R ² =82.52 Coef. corr.=0.91 D=39.14+46.91*(%B) ^{1/2}	

Tabla 59. Valores estadísticos del tiempo de demora de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.

En la Tabla 59 se han representado los resultados obtenidos de los modelos de regresión utilizados para estudiar la relación entre la demora de los ligeros y la demanda ciclista en cada escenario. Para este análisis se consideraron todos los escenarios conjuntamente, ya que no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las configuraciones en línea y en paralelo.

El estadístico R² obtenido en los tres modelos indica que los modelos ajustados explican un porcentaje elevado de la variabilidad en el tiempo de demora. Los coeficientes de correlación superiores a 0.91 indican una relación relativamente fuerte entre las variables. El escenario de demanda motorizada más elevada presenta una correlación ligeramente menor. La relación entre la demora y la demanda ciclista en el escenario para el escenario con menor demanda motorizada M1 es directamente proporcional, mientras que para los escenarios M2 y M3 la demora está relacionada directamente con la raíz cuadrada de la demanda ciclista.

- Porcentaje de demora respecto del tiempo total de recorrido

La tercera medida de desempeño analizada fue el porcentaje de demora respecto del tiempo total de recorrido del tramo de los ligeros. Esta variable permite la comparación entre escenarios y entre tramos de estudio, al no depender directamente de la longitud del tramo. En la Tabla 60 se presentan los valores estadísticos de esta variable. Se observa como el valor medio del porcentaje de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo es ligeramente más elevado en los escenarios donde los ciclistas circularon en línea, sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas en ninguno de los tres escenarios de tráfico motorizado simulados.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (%)	28.38	27.75	38.19	37.22	45.33	44.96
Desv. (%)	14.49	14.67	12.71	12.86	11.98	11.96
Comparación L-P ANOVA test	F=0.15 p-valor=0.696		F=0.47 p-valor=0.495		F=0.08 p-valor=0.781	
Modelo de regresión	R ² =94.10% Coef. corr.=0.97 %D/T=-3.60+21.92*(%B) ^{1/2}		R ² =90.81% Coef. corr.=0.95 %D/T=10.41+18.89*(%B) ^{1/2}		R ² =73.50% Coef. corr.=0.86 %D/T=22.16+15.91*(%B) ^{1/2}	

Tabla 60. Valores estadísticos del porcentaje del tiempo de demora respecto al tiempo de recorrido del tramo de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.

Al no obtener diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios del porcentaje de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo de los ligeros, se modelizó la relación entre esta variable y la demanda ciclista considerando los escenarios de ambas configuraciones juntos. En la Tabla 60 se observan los valores de los principales estadísticos de los modelos ajustados para cada uno de los tres escenarios de motorizados. Esta medida de desempeño presentó una relación directamente proporcional con la raíz de la demanda ciclista para los tres escenarios, obteniéndose en todos ellos valores elevados de los estadísticos de los modelos ajustados.

- Porcentaje vehículos motorizados en cola a la salida del tramo

En la Tabla 61 se presentan los resultados de la comparación entre las medias del porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo para las configuraciones en línea y en paralelo de los grupos de ciclistas en cada uno de los escenarios de tráfico motorizado.

El porcentaje de vehículos en cola se calculó considerando un umbral de 2.5 s para considerar que un vehículo circulaba en cola, y en su cálculo se consideraron también los motorizados que circularon en cola de bicicletas. Los valores medios de esta medida de desempeño para los escenarios en línea y en paralelo no presentaron diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% para ninguno de los tres escenarios de tráfico motorizado. Este resultado pone de manifiesto que la configuración en la que circulan los grupos de ciclistas no influye de manera significativa en el porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo para este tramo de estudio y para los niveles de tráfico analizados.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (%)	48.87	50.12	70.83	72.00	88.54	89.67
Desv. (%)	19.79	21.56	11.63	13.05	6.92	7.25
Comparación L-P ANOVA test	F=0.30 p-valor=0.583		F=0.73 p-valor=0.394		F=2.10 p-valor=0.148	
Modelo de regresión	R ² =88.57% Coef. corr.=0.94 %VC=0.06+0.30*(%B) ^{1/2}		R ² =83.90% Coef. corr.=0.91 %VC=0.46+0.18*(%B) ^{1/2}		R ² =43.92% Coef. corr.=0.66 %VC=0.79+0.07*(%B) ^{1/2}	

Tabla 61. Valores estadísticos del porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.

- Número de adelantamientos realizados por vehículo

Otra medida de desempeño que permite caracterizar la funcionalidad del tráfico en un tramo de carretera convencional es el número de adelantamientos realizados por vehículo durante su recorrido del tramo. En la Tabla 62 se muestran los valores medios de esta variable obtenidos de los escenarios considerando los grupos de ciclistas circulando en línea y en paralelo.

Se observa que el número de adelantamientos por vehículo fue mayor cuando los grupos circularon en paralelo. Esta diferencia fue estadísticamente significativa para los escenarios de tráfico motorizado más cargados M2 y M3. Por tanto, para niveles de tráfico motorizado más elevados la configuración del grupo de ciclistas influye en el número de adelantamientos realizados por vehículo, presentando un mayor número de adelantamientos los escenarios donde los ciclistas circularon en paralelo.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (adel/veh)	2.27	2.37	1.44	1.57	0.36	0.41
Desv. (adel/veh)	0.88	0.95	0.54	0.60	0.17	0.19
Comparación L-P ANOVA test	F=0.99 p-valor=0.321		F=4.15 p-valor=0.042		F=6.19 p-valor=0.013	
Modelo de regresión	R ² =85.64% Adel/veh=0.37+1.70*%B-0.26*%B ²		R ² =84.29% Adel/veh=0.30+1.00*%B-0.15*%B ²		R ² =72.78% Adel/veh=0.05+0.24*%B-0.03*%B ²	

Tabla 62. Valores estadísticos del número de adelantamientos realizados por vehículo configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.

En este caso el modelo que mejor se ha ajustado a los datos para describir la relación entre el número de adelantamientos por vehículo y la demanda ciclista incorporada en cada escenario ha sido un polinomial de segundo orden. En la Tabla 62 se muestran las ecuaciones de los modelos y los valores del estadístico R², el cual presentó para los tres escenarios de motorizados unos valores elevados, indicando que los modelos ajustados explicaban correctamente la variabilidad en el número de adelantamientos por vehículo.

- Densidad de seguidores

La última medida de desempeño analizada para este tramo de carretera fue la densidad de seguidores en la salida del tramo. En la Tabla 63 se muestran los valores medios de esta variable obtenidos en los escenarios según los grupos de ciclistas circularon en línea o en paralelo. En todos los casos las medias de la densidad de seguidores no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las configuraciones en línea y en paralelo con un nivel de significancia del 5%.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media	1.32	1.37	5.82	5.84	18.37	18.38
Desv.	0.8	0.9	1.65	1.87	3.46	3.54
Comparación L-P ANOVA test	F=0.34 p-valor=0.560		F=0.01 p-valor=0.925		F=0.01 p-valor=0.975	
Modelo de regresión	R ² =82.88% Coef. corr.=0.91 FD=0.13+0.49*%B		R ² =93.71% Coef. corr.=0.97 FD=2.00+2.64*(%B) ^{1/2}		R ² =70.34% Coef. corr.=0.84 FD=11.80+4.55*(%B) ^{1/2}	

Tabla 63. Valores estadísticos de la densidad de seguidores motorizados en la salida del según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-502 resultado de las simulaciones.

La relación de esta medida de desempeño con la demanda ciclista incorporada en cada escenario simulado se analizó mediante el ajuste de modelos de regresión. Para los tres escenarios de tráfico motorizado se obtuvieron valores de los estadísticos de los modelos ajustados elevados, indicando un buen ajuste de estos modelos (Tabla 63). La relación entre la densidad de seguidores de motorizados a la salida del tramo y la demanda ciclista fue directamente proporcional en los tres escenarios, estando relacionada en el M2 y el M3 con la raíz de la demanda ciclista.

5.3.1.2 Tramo de la CV-310

El primer paso realizado fue comprobar si los valores medios obtenidos de cada medida de desempeño presentaban diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes escenarios de tráfico motorizado simulados. En la Figura 109 se observan las medias de cada medida de desempeño y los correspondientes intervalos de Fisher resultados de todos los escenarios de demanda ciclista para cada uno de los tres escenarios de tráfico motorizado simulados.

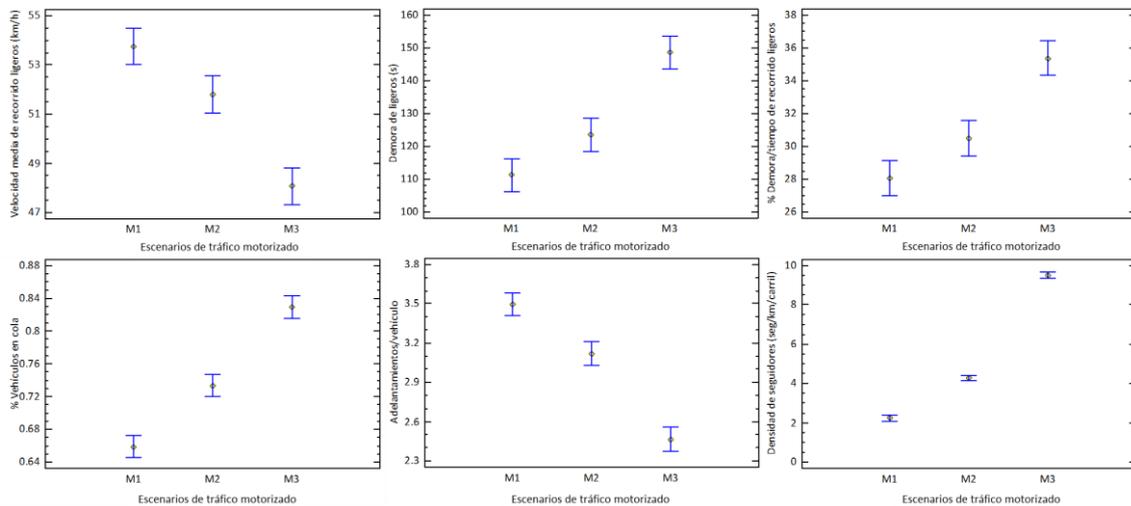


Figura 109. Medias e intervalos LSD de Fisher para las medidas de desempeño según los tres escenarios de tráfico simulados para la CV-310.

Se observa en la Figura 109 que las medias de todas las medidas de desempeño consideradas presentaron diferencias estadísticamente significativas para los tres niveles de tráfico motorizado analizados, por tanto, el estudio de la influencia de la configuración en línea o en paralelo de los grupos de ciclistas se realizó en cada uno de los tres escenarios de tráfico motorizado por separado.

Se realizaron pruebas ANOVA para comparar las medias de las medidas de desempeño analizadas entre las dos configuraciones de los grupos de ciclistas.

- Velocidad media de recorrido del tramo

La primera medida de desempeño analizada fue la velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros, cuyos valores estadísticos, considerando los escenarios en línea y en paralelo, se muestran en la Tabla 64. Los valores medios de la velocidad media de recorrido de los ligeros no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los escenarios en línea y en paralelo para ninguno de los tres escenarios de tráfico motorizado simulados, indicando que la configuración en la que circulaban los grupos de ciclistas no influyó en la

velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros para los niveles de tráfico analizados en estas simulaciones.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (km/h)	53.90	53.60	51.90	51.70	48.18	47.98
Desv. (km/h)	10.16	10.02	10.02	9.98	9.23	9.14
Comparación L-P ANOVA test	F=0.07 p-valor=0.791		F=0.03 p-valor=0.859		F=0.04 p-valor=0.843	
Modelo de regresión	R ² =92.87% Coef. corr.=0.96 V=1/(0.014+0.002*%B)		R ² =93.24% Coef. corr.=0.97 V=1/(0.015+0.002*%B)		R ² =95.24% Coef. corr.=0.98 V=1/(0.014+0.005*(%B) ^{1/2})	

Tabla 64. Valores estadísticos de la velocidad media de recorrido de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.

La relación entre la velocidad media de recorrido de los ligeros y la demanda ciclista se ha analizado mediante modelos de regresión. En la Tabla 64 se observan las ecuaciones obtenidas para cada nivel de tráfico motorizado, así como los valores de los estadísticos que miden la bondad del ajuste de estos modelos.

Los valores de R² fueron superiores al 92% para los tres modelos, indicando que los modelos ajustados explican una elevada variabilidad de la velocidad media de recorrido. En los tres casos la relación entre la velocidad y la demanda ciclista fue inversamente proporcional, presentando para el escenario más cargado de motorizados M3 una relación con la raíz de la demanda ciclista.

- Tiempo de demora

Otra medida de desempeño analizada fue el tiempo de demora de los vehículos ligeros. En la Tabla 65 se presentan los resultados de la prueba ANOVA de medias de esta variable entre los escenarios donde los grupos de ciclistas circularon en línea y en paralelo. En ninguno de los tres escenarios de tráfico motorizado se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las demoras de los vehículos ligeros con un nivel de confianza del 95%.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (s)	110.38	112.16	123.08	123.93	147.90	149.25
Desv. (s)	66.43	65.46	67.89	67.33	65.56	64.61
Comparación L-P ANOVA test	F=0.06 p-valor=0.807		F=0.01 p-valor=0.910		F=0.04 p-valor=0.851	
Modelo de regresión	R ² =92.35% Coef. corr.=0.96 D=11.33+39.97*%B		R ² =92.40% Coef. corr.=0.96 D=21.05+40.98*%B		R ² =95.41% Coef. corr.=0.98 D=6.27+98.52*(%B) ^{1/2}	

Tabla 65. Valores estadísticos del tiempo de demora de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.

La relación entre el tiempo de demora de los vehículos ligeros y la demanda ciclista incorporada en cada escenario de simulación se analizó mediante el ajuste de modelos de regresión. En la Tabla 65 se muestran las ecuaciones obtenidas para cada uno de los escenarios de tráfico motorizado simulados. Estas ecuaciones mostraron una relación directamente proporcional entre las dos variables, siendo para el escenario más cargado de motorizados M3 la demora proporcional a la raíz de la demanda ciclista.

Los estadísticos obtenidos de los modelos indicaron un buen ajuste de estos, obteniendo valores del estadístico R^2 , que representa el porcentaje de variabilidad de la demora explicado por el modelo, elevados. Los coeficientes de correlación entre las variables también presentaron valores elevados, superiores a 0.96.

- Porcentaje de demora respecto del tiempo total de recorrido

El porcentaje de tiempo de demora respecto al tiempo de recorrido total del tramo de los vehículos ligeros también fue analizado. En la Tabla 66 se muestran los resultados de la comparativa entre las configuraciones en línea y en paralelo para cada uno de los tres escenarios de tráfico motorizado.

Estas comparativas se realizaron mediante una prueba ANOVA, y los resultados mostraron que no existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias de esta variable con un nivel de significación del 5%. Estos resultados indican que, para los tres niveles de tráfico motorizado simulados, la configuración en la que circularon los grupos de ciclistas no influyó en el porcentaje de demora respecto el tiempo de recorrido del tramo de los motorizados.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (%)	27.77	28.34	30.32	30.66	35.23	35.51
Desv. (%)	14.63	14.50	14.36	14.31	13.15	13.08
Comparación L-P ANOVA test	F=0.13 <i>p-valor</i> =0.718		F=0.05 <i>p-valor</i> =0.830		F=0.04 <i>p-valor</i> =0.843	
Modelo de regresión	R ² =92.11% Coef. corr.=0.96 %D/T=-3.25+21.67*(%B) ^{1/2}		R ² =94.08% Coef. corr.=0.97 %D/T=-1.00+21.55*(%B) ^{1/2}		R ² =92.73% Coef. corr.=0.96 %D/T=7.10+19.57*(%B) ^{1/2}	

Tabla 66. Valores estadísticos del porcentaje del tiempo de demora respecto al tiempo de recorrido del tramo de los motorizados según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.

A partir de estos resultados se ajustaron unos modelos para describir la relación entre esta variable y la demanda ciclista incorporada en cada uno de los escenarios simulados. en la Tabla 66 se muestran los estadísticos obtenidos de estos modelos, así como las ecuaciones.

Se observa que para los tres escenarios de motorizados la relación entre esta variable fue directamente proporcional coa la raíz de la demanda ciclista. Los estadísticos de los modelos indicaron un buen ajuste de estos, con valores de R^2 superiores al 92%.

- Porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo

El porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo obtenido en los escenarios donde los ciclistas circulaban en línea se comparó con los correspondientes a la circulación de los ciclistas en paralelo.

La Tabla 67 muestra los resultados de la prueba ANOVA realizada, indicando que no existen diferencias estadísticamente significativas, con un nivel de significancia del 5%, entre las medias de los porcentajes de vehículos en cola cuando los grupos de ciclistas circularon en línea y en paralelo. Por tanto, la configuración en la que circularon los grupos de ciclistas no presentó influencia ninguna en el porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo de estudio para los escenarios de tráfico simulados.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (%)	65.5	66.26	73.10	73.58	82.93	82.94
Desv. (%)	22.15	22.27	18.54	18.60	11.52	11.50
Comparación L-P ANOVA test	F=0.09 p-valor=0.762		F=0.05 p-valor=0.816		F=0.01 p-valor=0.996	
Modelo de regresión	R ² =88.71% Coef. corr.=0.94 %VC=0.19+0.32*%B ^{1/2}		R ² =90.14% Coef. corr.=0.95 %VC=0.34+0.27*%B ^{1/2}		R ² =90.26% Coef. corr.=0.95 %VC=0.58+0.17*%B ^{1/2}	

Tabla 67. Valores estadísticos del porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.

La relación entre el porcentaje de vehículos motorizados en cola a la salida del tramo y la demanda ciclista incorporada en cada escenario de simulación se ha analizado mediante modelos de regresión.

La Tabla 67 presenta las ecuaciones de estos modelos para cada escenario de tráfico motorizado. Estas ecuaciones indican una relación directamente proporcional del porcentaje de vehículos motorizados en cola con la raíz de la demanda ciclista. Los valores del estadístico R² superiores al 88% indican que los modelos ajustados explican un elevado porcentaje de la variabilidad de esta variable. Los coeficientes de correlación indican una elevada correlación entre las variables.

- Número de adelantamientos realizados por vehículo

Se ha analizado la influencia de la configuración en la que circularon los grupos de ciclistas en el número de adelantamientos realizados por vehículo en los tres escenarios de tráfico motorizado independientemente. Los valores obtenidos de la prueba ANOVA comparando los valores medios de esta variable se observan en la Tabla 68.

Para ninguno de los tres escenarios de tráfico motorizado se han obtenido diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. Estos resultados indican que la configuración en la que circulan los grupos de ciclistas no influye en el número de adelantamientos realizados por vehículo para los niveles de tráfico simulados en este tramo de estudio.

Se registran más adelantamientos cuando los grupos circulan en línea en el escenario de motorizados M1 y M2, debido en este caso a las menores duraciones registradas en esta configuración sobre todo para grupos pequeños de ciclistas. Sin embargo, las diferencias entre el número de adelantamientos entre línea y paralelo no son significativas.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media (adel/veh)	3.52	3.47	3.14	3.10	2.46	2.47
Desv. (adel/veh)	1.39	1.34	1.21	1.17	0.91	0.90
Comparación L-P ANOVA test	F=0.14 p-valor=0.708		F=0.08 p-valor=0.782		F=0.01 p-valor=0.947	
Modelo de regresión	R ² =69.42% Adel/veh=0.90+2.55*%B- 0.43*%B ²		R ² =67.55% Adel/veh=0.96+2.27*%B- 0.40*%B ²		R ² =66.89% Adel/veh=0.83+1.71*%B- 0.30*%B ²	

Tabla 68. Valores estadísticos del número de adelantamientos realizados por vehículo configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.

En este caso el modelo que mejor se ha ajustado a los datos para describir la relación entre el número de adelantamientos por vehículo y la demanda ciclista incorporada en cada escenario ha sido un polinomial de segundo orden. En la Tabla 68 se presentan las ecuaciones de los modelos obtenidos para cada escenario de tráfico motorizado, así como los valores del estadístico R^2 que indica el porcentaje de variabilidad de la variable explicada por los modelos.

- Densidad de seguidores

Finalmente se ha analizado la influencia de la configuración en línea o en paralelo de los grupos de ciclistas sobre la densidad de seguidores motorizados en la salida del tramo. En la Tabla 69 se presentan los valores obtenidos de la prueba ANOVA realizada comparando los valores medios de la densidad de seguidores.

Se observa que para ninguno de los tres escenarios motorizados simulados se han obtenidos diferencias estadísticamente significativas entre las medias de esta variable. Por tanto, la configuración en la que circularon los grupos de ciclistas por el tramo no tuvo influencia en la densidad de seguidores motorizados a la salida del tramo para el tramo de estudio y considerando los niveles de tráfico simulados.

Estadístico	M1 (N=330)		M2 (N=330)		M3 (N=330)	
	L	P	L	P	L	P
N	165	165	165	165	165	165
Media	2.23	2.25	4.27	4.29	9.52	9.51
Desv.	1.07	1.06	1.73	1.72	2.70	2.68
Comparación L-P ANOVA test	F=0.04 <i>p</i> -valor=0.835		F=0.02 <i>p</i> -valor=0.885		F=0.01 <i>p</i> -valor=0.968	
Modelo de regresión	R ² =92.48% Coef. corr.=0.96 FD=0.63+0.65*%B		R ² =93.57% Coef. corr.=0.97 FD=1.64+1.05*%B		R ² =97.53% Coef. corr.=0.99 FD=3.56+4.12*(%B) ^{1/2}	

Tabla 69. Valores estadísticos de la densidad de seguidores motorizados en la salida del según configuración de los grupos de ciclistas para la CV-310 resultado de las simulaciones.

En la Tabla 69 se observan las ecuaciones obtenidas de los modelos ajustados que representan la relación entre la densidad de seguidores y la demanda ciclista. La relación entre estas dos variables es directamente proporcional, indicando que a medida que aumenta la demanda ciclista en el tramo la densidad de seguidores en la salida del tramo también es mayor. Los valores de los estadísticos obtenidos para estos modelos indican un ajuste correcto.

5.3.1.3 Resumen del análisis de la configuración de los grupos de ciclistas

Las diferencias entre las configuraciones en línea o en paralelo en las que circulan los grupos de ciclistas son en general despreciables, considerando todas las medidas de desempeño analizadas en este apartado.

Para el tramo de la CV-502, solamente para el porcentaje de adelantamientos realizados por vehículo esta diferencia es significativa en los escenarios de tráfico motorizado menos cargados, obteniéndose más adelantamientos cuando los grupos circulan en paralelo debido al menor tiempo necesario para adelantarles, lo que hace que en estos escenarios se produzcan más adelantamientos.

Las otras medidas de desempeño no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones, sin embargo, los valores medios fueron ligeramente mejores para la configuración en paralelo.

En cambio, para el tramo de la CV-310 ninguna medida de desempeño de las analizadas ha presentado diferencias estadísticamente significativas entre los valores obtenidos para las simulaciones cuando los grupos circularon en paralelo y cuando lo hicieron en línea.

Estos resultados ponen de manifiesto que la configuración en línea o en paralelo de los grupos de ciclistas no afecta, en general, a la funcionalidad del tráfico en las carreteras convencionales estudiadas. En carreteras estrechas, las configuraciones en paralelo de los grupos mejoran levemente las medidas de desempeño analizadas, sin embargo, esta mejora solamente ha sido significativa para el número de adelantamientos realizados por vehículo.

5.3.2 Tamaño del grupo de ciclistas

En este apartado se determina cómo afecta el tamaño de los grupos de ciclistas a las diferentes medidas de desempeño que caracterizan la funcionalidad del tráfico. 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 estrecha de la CV-502, ya que se ha comprobado que esta carretera estrecha es más sensible a la circulación de ciclistas.

Se han diseñado varios escenarios de tráfico variando el número de ciclistas presentes en el tramo, así como su agrupación en grupos de diferente tamaño, considerando grupos formados por uno, dos, cuatro y diez ciclistas. A partir del resultado obtenido en el apartado anterior, en el que se comparaban las configuraciones de los grupos en línea y en paralelo, no obteniendo diferencias entre las dos configuraciones, este análisis se ha realizado considerando a los grupos circulando solamente en paralelo.

En la Tabla 70 se muestran los escenarios de tráfico ciclista diseñados considerando tres volúmenes de ciclistas y su agrupación en diferentes tamaños del grupo. 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	0	30	0	0	0	100	0	0	0	300	0	0
4P	0	0	15	0	0	0	50	0	0	0	150	0
10P	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 70. Escenarios de tráfico ciclista según tamaño del grupo (ciclistas/h).

Estos escenarios de demanda ciclista se simularon considerando tres escenarios de demanda de tráfico motorizado, correspondientes a los mostrados en la Tabla 54. Así, se simularon 12 escenarios de tráfico ciclistas por cada escenario de tráfico motorizado, resultando en un total de 36 escenarios, en los que se realizaron 15 replicaciones de cada uno, generando un total de 540 simulaciones.

Para cada escenario simulado se calculó el valor promedio de las siguientes medidas de desempeño: velocidad media de recorrido de los ligeros (V_{mr}), demora de los ligeros (D), porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje ($\%(D/T)$), número de adelantamientos por vehículo (Adel/veh), porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo (%VC) y densidad de vehículos seguidores a la salida del tramo (FD).

En la Tabla 71 se muestran los resultados obtenidos para cada medida de desempeño correspondientes a las simulaciones de una demanda de 60 ciclistas/h.

Tráfico motorizado	Medida de desempeño	Tamaño del grupo de ciclistas				Tasa de variación		
		1	2P	4P	10P	1 a 2P	1 a 4P	1 a 10P
M1	V _{mr} (km/h)	58.15	61.58	63.57	64.73	6%	9%	11%
	D (s/veh)	19.83	10.17	5.29	2.87	-49%	-73%	-86%
	%(D/T)	13.51	7.60	4.16	2.32	-44%	-69%	-83%
	Adel/veh	1.95	1.25	0.71	0.32	-36%	-64%	-84%
	%VC	24.0%	19.5%	16.3%	14.8%	-19%	-32%	-38%
	FD	0	0	0	0	-24%	-38%	-44%
M2	V _{mr} (km/h)	47.36	51.90	56.19	59.89	10%	19%	26%
	D (s/veh)	54.07	38.54	25.54	15.02	-29%	-53%	-72%
	%(D/T)	30.45	23.72	17.14	10.73	-22%	-44%	-65%
	Adel/veh	1.38	0.91	0.54	0.26	-34%	-61%	-81%
	%VC	57.5%	53.7%	49.7%	45.7%	-7%	-14%	-20%
	FD	4	3	3	2	-14%	-26%	-35%
M3	V _{mr} (km/h)	37.20	41.89	47.54	54.77	13%	28%	47%
	D (s/veh)	100.58	80.12	57.46	30.26	-20%	-43%	-70%
	%(D/T)	45.21	39.48	31.56	19.50	-13%	-30%	-57%
	Adel/veh	0.29	0.19	0.09	0.05	-37%	-68%	-84%
	%VC	86.9%	85.4%	81.6%	73.6%	-2%	-6%	-15%
	FD	18	15	13	10	-12%	-27%	-45%

Tabla 71. Medidas de desempeño calculadas para el nivel de demanda ciclista baja (60 ciclistas/h) según el tamaño del grupo de ciclistas.

Para este nivel de demanda ciclista baja todas las medidas de desempeño presentaron valores más favorables cuando los ciclistas circularon en grupos más grandes que cuando lo hicieron individualmente. La velocidad media de recorrido fue mayor para los escenarios en los que los ciclistas estaban agrupados en pelotones de diez ciclistas, comparada con la obtenida en las otras agrupaciones de ciclistas. A medida que el tráfico motorizado aumentó en el tramo, la velocidad media de recorrido fue mayor para los grupos de diez ciclistas, aumentando en un 11% para el tráfico motorizado M1, en un 26% para el M2 y en un 47% para el M3, respecto a la circulación de ciclistas individualmente.

Respecto a la demora y el porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje evolucionaron de manera similar al variar el tráfico motorizado y el tamaño de los grupos de ciclistas. Para los escenarios con los ciclistas circulando en grupos de diez se registraron las demoras menores, reduciéndose respecto del escenario en el que los ciclistas circulaban individualmente en un 86% para el nivel de tráfico motorizado M1, en un 72% para el M2 y en un 70% para el M3. El número de adelantamientos por vehículo disminuyó a medida que los ciclistas se agruparon en pelotones de mayor tamaño para los tres escenarios de tráfico motorizado. Esta disminución fue alrededor del 80% del grupo de diez ciclistas respecto de los individuales para los tres escenarios motorizados.

Finalmente, las medidas relacionadas con el seguimiento entre usuarios también mostraron una mejora a medida que se agrupaban los ciclistas en pelotones de mayor tamaño. Estas mejoras fueron mayores para el escenario de tráfico motorizado menor, debido a que en los escenarios con elevado tráfico motorizado las medidas de seguimiento ya presentan valores elevados debido al propio tráfico motorizado.

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de la demanda media de ciclistas, correspondiente a 200 ciclistas/h, se muestran en la Tabla 72.

Tráfico motorizado	Medida de desempeño	Tamaño del grupo de ciclistas				Tasa de variación		
		1	2P	4P	10P	1 a 2P	1 a 4P	1 a 10P
M1	V _{mr} (km/h)	44.92	52.91	59.41	62.74	18%	32%	40%
	D (s/veh)	66.27	36.67	15.97	7.75	-45%	-76%	-88%
	%(D/T)	35.12	22.70	11.31	5.89	-35%	-68%	-83%
	Adel/veh	3.17	2.53	1.73	0.77	-20%	-45%	-76%
	%VC	48.0%	33.7%	23.6%	19.1%	-30%	-51%	-60%
	FD	1	1	0	0	-42%	-65%	-73%
M2	V _{mr} (km/h)	38.18	42.79	47.90	53.84	12%	25%	41%
	D (s/veh)	93.81	72.32	52.57	33.27	-23%	-44%	-65%
	%(D/T)	43.61	37.11	29.85	21.16	-15%	-32%	-51%
	Adel/veh	2.07	1.71	1.14	0.59	-18%	-45%	-71%
	%VC	66.0%	62.0%	57.5%	52.7%	-6%	-13%	-20%
	FD	6	5	4	3	-19%	-33%	-44%
M3	V _{mr} (km/h)	33.42	35.15	38.02	45.85	5%	14%	37%
	D (s/veh)	121.46	111.42	96.86	64.61	-8%	-20%	-47%
	%(D/T)	50.11	47.81	44.14	33.99	-5%	-12%	-32%
	Adel/veh	0.59	0.38	0.23	0.10	-35%	-61%	-83%
	%VC	83.2%	85.9%	87.8%	83.1%	3%	6%	0%
	FD	18	18	17	14	0%	-3%	-24%

Tabla 72. Medidas de desempeño calculadas para el nivel de demanda ciclista media (200 ciclistas/h) según el tamaño del grupo de ciclistas.

Para esta demanda de ciclistas, la velocidad media de los ligeros aumenta a medida que el tamaño de los grupos ciclistas es mayor, sin embargo, esta mejora es ligeramente más elevada para el nivel de tráfico motorizado menor M1.

Las medidas de desempeño relacionadas con la demora sufrida por los ligeros también se ven mejoradas para agrupaciones de mayor tamaño de ciclistas, aunque estas mejoras se ven reducidas a medida que aumenta el tráfico motorizado en el tramo. El número de adelantamientos realizados por vehículo se redujo cuando el tamaño de los grupos de ciclistas fue mayor, esta reducción fue similar en los escenarios de tráfico motorizado M1 y M2, mientras que para el nivel de tráfico motorizado más elevado M3 la reducción fue mayor.

Las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios presentaron diferentes comportamientos según el nivel de tráfico motorizado. Para los niveles M1 y M2 el %VC y la FD presentaron reducciones en los grupos de ciclistas de mayor tamaño respecto de los individuales, siendo esta reducción menor a medida que aumentó el tráfico motorizado. Para el nivel de tráfico motorizado más elevado M3 el %VC no presentó variaciones entre los diferentes tamaños de los grupos de ciclistas, siendo ya muy elevado en todos ellos.

Por último, la Tabla 73 muestra los resultados obtenidos para las diferentes medidas de desempeño considerando diferentes tamaños de los grupos de ciclistas y para los tres niveles de tráfico motorizado. También se representan las variaciones de estas medidas entre los diferentes tamaños de los grupos de ciclistas para cada nivel de tráfico motorizado.

Tráfico motorizado	Medida de desempeño	Tamaño del grupo de ciclistas				Tasa de variación		
		1	2P	4P	10P	1 a 2P	1 a 4P	1 a 10P
M1	V _{mr} (km/h)	33.82	38.67	47.68	56.55	14%	41%	67%
	D (s/veh)	121.06	93.68	55.28	25.03	-23%	-54%	-79%
	%(D/T)	49.93	43.53	31.05	16.48	-13%	-38%	-67%
	Adel/veh	1.77	2.74	3.03	1.88	55%	71%	7%
	%VC	65.5%	58.8%	39.5%	26.8%	-10%	-40%	-59%
	FD	2	2	1	1	-22%	-60%	-78%
M2	V _{mr} (km/h)	32.85	35.50	39.10	44.12	8%	19%	34%
	D (s/veh)	126.96	109.10	89.09	67.11	-14%	-30%	-47%
	%(D/T)	51.21	47.40	42.32	35.53	-7%	-17%	-31%
	Adel/veh	1.28	1.91	1.88	1.16	50%	47%	-9%
	%VC	75.4%	69.8%	64.8%	62.7%	-7%	-14%	-17%
	FD	8	7	5	5	-16%	-32%	-41%
M3	V _{mr} (km/h)	31.82	32.68	33.56	35.84	3%	5%	13%
	D (s/veh)	133.79	126.83	120.83	107.60	-5%	-10%	-20%
	%(D/T)	52.53	51.20	49.94	46.99	-3%	-5%	-11%
	Adel/veh	0.48	0.59	0.45	0.23	23%	-6%	-53%
	%VC	85.9%	82.6%	84.7%	88.9%	-4%	-1%	3%
	FD	19	18	18	19	-6%	-6%	-4%

Tabla 73. Medidas de desempeño calculadas para el nivel de demanda ciclista alta (600 ciclistas/h) según el tamaño del grupo de ciclistas

Se observa que la velocidad media de recorrido es mayor cuando los grupos de ciclistas son de mayor tamaño en los tres escenarios de tráfico motorizado. Sin embargo, esta mejora de la velocidad es más significativa cuando el tráfico motorizado es más bajo. Las medidas de desempeño relacionadas con la demora de los ligeros también presentan mejoras cuando el tamaño de los grupos de ciclistas es mayor respecto a cuando los ciclistas circulan individualmente. Estas reducciones en la demora y en el porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje son menores para niveles de tráfico motorizado más elevados.

El número de adelantamiento por vehículo, para esta demanda ciclista más elevada, presenta una evolución diferente respecto de las demandas ciclistas menores. En este caso, al tratarse de una demanda ciclista elevada, el número de adelantamientos depende del número de grupos introducidos y de la duración del adelantamiento de cada grupo, registrando más adelantamiento para los grupos de cuatro ciclistas en el nivel de motorizado M1, y para los grupos de dos ciclistas en los niveles de motorizados M2 y M3.

Las medidas relacionadas con el seguimiento, en este nivel de demanda ciclista tan elevada, presentan mejoras cuando los grupos de ciclistas son de mayor tamaño, pero estas mejoras son menores a medida que aumenta el tráfico motorizado, siendo para el nivel de motorizados M3 prácticamente nulas.

Estos resultados se resumen según la afcción a cada medida de desempeño analizada. Observando los resultados de la velocidad media de recorrido, se prefiere la circulación de grupos de gran tamaño frente a ciclistas individuales. La velocidad se ve mejorada sobre todo para los escenarios con demandas elevadas de ciclistas y reducidas de motorizados, y para demandas elevadas de motorizados y reducidas de ciclistas.

En cuanto a las medidas relacionadas con la demora (D y %(D/T)), la demora se ve reducida cuando el tamaño de los grupos es mayor respecto a cuando los ciclistas circulan individualmente. Esta mejora es más acusada para demandas de ciclistas y de motorizados bajas. El número de adelantamientos por vehículo se ve reducido a medida que circulan grupos de

mayor tamaño, ya que se deben de realizar menos adelantamiento, sin embargo, para demandas ciclistas elevadas, la circulación de grupos de tamaño medio genera un mayor número de adelantamientos sobre todo en niveles de tráfico motorizado no elevados. Las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios presentan mejoras cuando los ciclistas circulan en grupos de tamaño mayor, estas mejoras son más evidentes cuando el nivel de motorizados es menor, siendo despreciables para niveles de motorizados elevados.

Por tanto, en general, se prefieren tamaños de grupos de ciclistas mayores frente a los mismos ciclistas circulando individualmente, ya que suponen un menor número de interacciones, y por tanto afectan en menor medida a la funcionalidad del tráfico. Sin embargo, cuando las demandas ciclistas y las motorizadas son más elevadas, la circulación de grupos de tamaño medio es más aconsejable, ya que suponen un término medio entre el número de grupos y la duración requerida para adelantarles.

5.3.3 Velocidad máxima de adelantamiento a ciclistas

En este apartado se ha realizado un estudio con el fin de analizar la influencia de la reducción de la velocidad máxima en el momento de adelantar a ciclistas. Para tal fin se ha considerado una reducción de la velocidad límite en 20 km/h respecto de la máxima permitida en la vía para realizar adelantamientos a ciclistas. Esta medida ha sido sugerida por la Dirección General de Tráfico en un coloquio realizado en enero de 2021 como posible medida a incorporar en la legislación correspondiente para aumentar la seguridad de los ciclistas en carretera.

El análisis se ha llevado a cabo utilizando el modelo de microsimulación de tráfico debidamente calibrado y validado con datos de campo correspondientes al tramo de estudio de la carretera CV-502. Previamente al uso del modelo de microsimulación se han analizado los datos observados en campo considerando todos los tramos de carretera observados.

5.3.3.1 Análisis de los datos observados

Se han analizado los datos recogidos con las bicicletas instrumentadas para evaluar el efecto de la reducción de velocidad del vehículo adelantante durante la maniobra de adelantamiento a ciclistas según las diferentes configuraciones de los grupos de ciclistas de las que se tienen datos recogidos en campo. Para ello se requiere analizar la relación entre la velocidad del adelantamiento y la duración de este, así como entre la velocidad del adelantamiento y la separación lateral entre el vehículo adelantante y las bicicletas.

La Figura 110 representa los datos de velocidades registradas durante el adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas frente a la duración de estos adelantamientos. La dispersión es elevada debido a que se han considerado todos los datos disponibles de adelantamientos realizados por vehículos ligeros, sin diferenciar por la configuración del grupo de ciclistas adelantados ni por la carretera en la que se tomaron los datos.

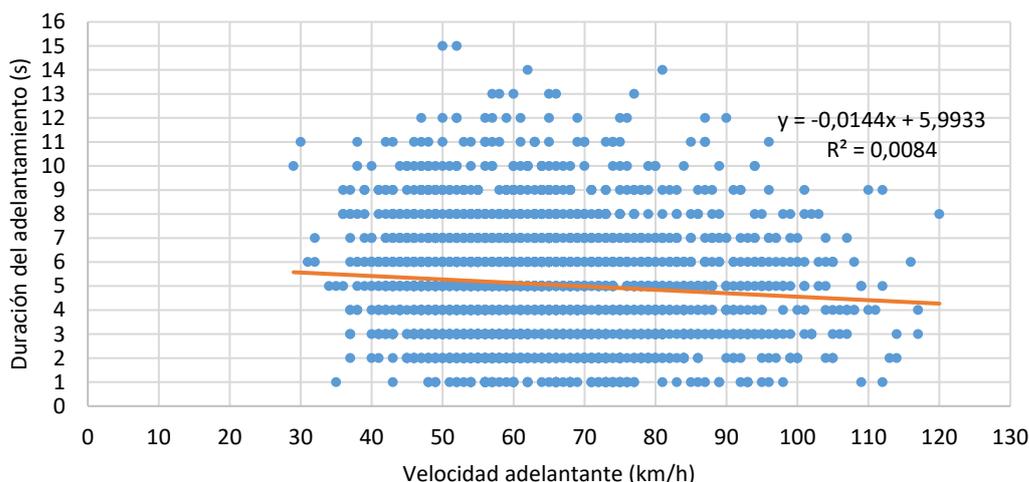


Figura 110. Relación entre la duración del adelantamiento y velocidad del adelantante considerando los datos recogidos en campo relativos a adelantamientos realizados por vehículos ligeros.

A partir de la línea de tendencia calculada teniendo en cuenta todas las observaciones, se observa que las maniobras en las que la velocidad del adelantante es mayor presentan una duración menor. Menores duraciones del adelantamiento implican menores tiempos de exposición al riesgo de colisión frontal con los vehículos opuestos, representando menores tiempos en los que el vehículo adelantante circula por el carril opuesto, y, por tanto, desde el punto de vistas de la seguridad vial, se consideran más seguras.

Los datos de velocidades del vehículo adelantante se han agrupado por intervalos de 10 km/h, y se ha representado en la Figura 111 el valor promedio de la duración del adelantamiento para cada intervalo de velocidad del adelantamiento, considerando las diferentes configuraciones del grupo de ciclistas adelantado.

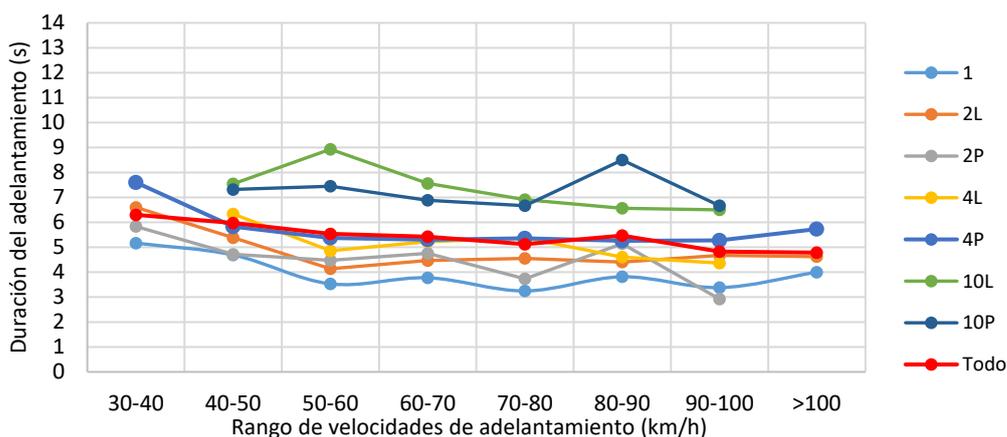


Figura 111. Duraciones medias del adelantamiento e intervalos de velocidades del adelantante según la configuración del grupo de ciclistas.

Generalmente las duraciones del adelantamiento a los grupos de menor tamaño son menores que las realizadas a grupos de mayor tamaño. En todos los casos se observa que a mayor velocidad del adelantante la duración de los adelantamientos es menor. En los grupos formados

por 10 ciclistas existe un número menor de observaciones, y puede que los resultados están influenciados por el tramo de carreteras en el que se han observado.

En la Figura 111 se ha representado en rojo el valor promedio de las duraciones considerando todos los grupos de ciclistas para cada intervalo de velocidades del adelantante. Se observa la misma tendencia, los adelantamientos realizados a mayor velocidad presentan una menor duración de la maniobra, y por tanto una menor exposición al riesgo de colisión frontal con los vehículos en sentido opuesto. Una menor duración de la maniobra también facilita la maniobra de adelantamiento, generando más maniobras de adelantamiento y por tanto mejorando la funcionalidad del tráfico.

Otra variable importante relacionada con la maniobra de adelantamiento a ciclistas es la separación lateral entre el vehículo adelantante y el grupo de ciclistas adelantado. Se ha representado la separación lateral entre el vehículo adelantante y el grupo de ciclistas según la velocidad del vehículo adelantante durante la maniobra (Figura 112). Se observa como la separación lateral es mayor en los adelantamientos que se producen con una mayor velocidad por parte del vehículo adelantante.

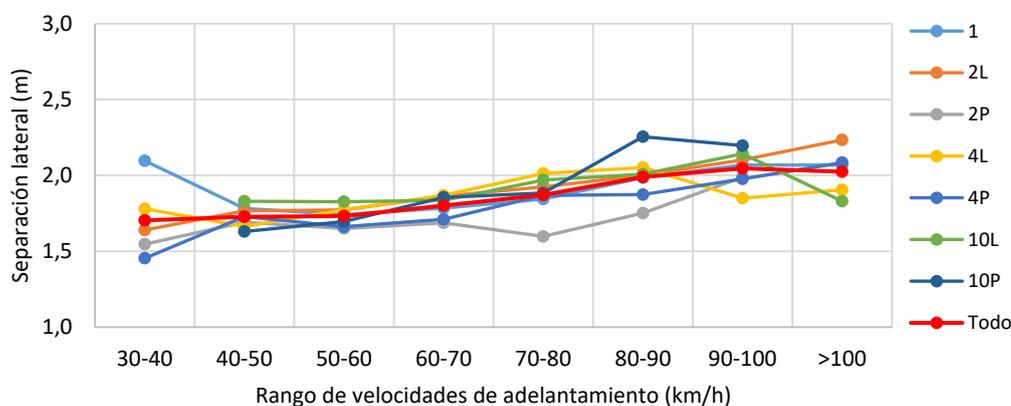


Figura 112. Separaciones laterales medias e intervalos de velocidades del adelantante según la configuración del grupo de ciclistas.

Se observan mayores separaciones laterales medias en los adelantamientos que se han producido con mayores velocidades del adelantante. Este comportamiento se observa en todas las configuraciones de los grupos de ciclistas estudiados. La misma tendencia es observada al representar el promedio considerando el conjunto de los datos (línea roja en la Figura 112).

Por tanto, a partir de las observaciones, se puede asegurar que los adelantamientos que se han producido a velocidades mayores presentan también separaciones laterales mayores, resultando estas mayores separaciones, más seguras para los ciclistas.

5.3.3.2 Simulación en Aimsun Next

La microsimulación del tráfico es una herramienta que permite simular escenarios considerando diferentes medidas, que pueden actuar tanto sobre el tráfico como sobre la geometría de la carretera, y analizar el efecto de estas medidas a partir de los resultados obtenidos en las simulaciones.

El microsimulador de tráfico utilizado en esta investigación, Aimsun Next, permite simular el comportamiento real de los adelantamientos en carreteras convencionales. Para ello dispone de un parámetro que permite regular la velocidad durante el adelantamiento cuando la

diferencia de velocidades entre adelantado y adelantante supera un umbral. Por defecto este umbral es de 15 km/h, y el valor del parámetro es de 1.1. Esto permite a los vehículos adelantar a otro usuario cuando sus velocidades difieren en 15 km/h aumentando su velocidad máxima deseada hasta un 10%.

Generalmente esta variación de la velocidad durante el adelantamiento no se utiliza en adelantamientos a bicicletas, ya que la diferencia de velocidades suele ser mayor de 15 km/h, y, por tanto, no es necesario sobrepasar la velocidad máxima deseada para realizar el adelantamiento. Sin embargo, 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.

Este estudio se realizó utilizando el modelo debidamente calibrado y validado para el tramo de carretera de la CV-502, en el que la velocidad límite del tramo es de 70 km/h.

En el primer escenario se dejaron 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 fue 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 113.

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 113. 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 114.

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

Se ha simulado el mismo escenario de tráfico, tanto de vehículos motorizados como de bicicletas, para los dos escenarios. Se ha considerado una demanda de vehículos motorizados correspondiente al escenario de demanda máxima de bicicletas obtenido en las tomas de datos a nivel macroscópico, denominado en apartados anteriores Calmax para el tramo de la CV-502, mientras que la demanda de bicicletas correspondió al doble del observado en el escenario Calmax para el tramo de la CV-502, forzando así más interacciones entre vehículos y bicicletas. En la Tabla 74 se observa el escenario de tráfico simulado correspondiente a usuarios por hora.

Usuarios/hora	Nº usuarios
2 ciclistas en paralelo	16
4 ciclistas en paralelo	8
10 ciclistas en paralelo	24
1 ciclista individual	80
Vehículos Ligeros	120
Vehículos Ligeros Opuestos	152

Tabla 74. Escenario de tráfico simulado (usuarios/hora) para el análisis de la reducción de velocidad de adelantamiento.

Después de realizar las simulaciones de los dos escenarios se analizaron los resultados obtenidos.

A nivel macroscópico, o de sección, las medidas de desempeño que caracterizan la funcionalidad del tráfico se han visto afectadas al aplicar esta medida. Se han calculado los valores medios del tiempo de demora, de la velocidad media de recorrido y del número de adelantamientos realizados por cada vehículo considerando todos los vehículos que han circulado por el segmento en el sentido de estudio. Los resultados de estas medidas de desempeño para los dos escenarios simulados se muestran en la Tabla 75.

Escenario de velocidad de adelantamiento	Tiempo de demora (s)	Velocidad media de recorrido (km/h)	Número de adelantamientos/veh
Velocidad límite de 70 km/h	40.41	53.93	6.20
50 km/h (reducción de 20km/h)	52.2	49.93	5.44
Variación	29%	-7%	-12%

Tabla 75. Medidas de desempeño a nivel macroscópico considerando los escenarios con velocidad de adelantamiento igual a la límite y reducción de 20km/h.

Al aplicar una reducción de velocidad de 20 km/h durante el adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas, el tiempo de demora ha aumentado en un 29%, la velocidad media de recorrido del tramo se ha reducido en un 7%, y se han producido un 12% menos de adelantamientos por vehículo en el tramo.

A nivel microscópico, observando el comportamiento de cada usuario, también se han visto afectados los resultados. La Tabla 76 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.

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

Tabla 76. Duraciones medias del adelantamiento(s) a los diferentes grupos de ciclistas considerando los dos escenarios, y variación entre el escenario 1 y el 2.

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.

Se han representado los diagramas espacio-tiempo (ver Figura 115, Figura 116 y Figura 117 superiores) en los que se observa la trayectoria de diferentes vehículos considerando que la velocidad al adelantar es la velocidad límite (70 km/h) y que la velocidad al adelantar se reduce en 20 km/h, siendo en este caso de 50 km/h.

También se han representado los diagramas de velocidades de estos vehículos considerando los dos comportamientos descritos (Figura 115, Figura 116 y Figura 117 inferiores).

En naranja se observa la trayectoria y la velocidad del vehículo en el escenario donde se permite realizar los adelantamientos con una velocidad igual a la velocidad límite de la carretera de 70 km/h, en azul se representa su trayectoria y su velocidad cuando el vehículo es forzado a reducir su velocidad en 20 km/h durante el adelantamiento, realizando así la maniobra a 50 km/h.

Se han representado las trayectorias y velocidades de tres vehículos con comportamientos representativos del conjunto de vehículos que han recorrido el tramo. Se pueden observar maniobras de adelantamiento tanto lanzadas como iniciadas desde un seguimiento previo al grupo de ciclistas.

Vehículo 1

Este vehículo en el primer escenario, correspondiente a la trayectoria naranja, ha adelantado a cuatro ciclistas individuales, a un grupo de dos ciclistas y a un grupo de diez ciclistas, en este orden. Entre los segundos 65 y 73 ha realizado seguimiento al cuarto ciclista individual. Este comportamiento del vehículo 1 en el primer escenario se observa en la Figura 115 en color naranja

En el segundo escenario (Figura 115 en azul), debido a las reducciones de velocidad producidas durante los adelantamientos, solamente ha adelantado a los cuatro ciclistas individuales y al grupo de dos ciclistas. Al adelantar a los tres primeros ciclistas individuales ha mantenido la velocidad reducida para el adelantamiento a 50 km/h, ya que estos tres ciclistas circulan próximos entre sí. Para adelantar al cuarto ciclista y al grupo de dos ciclistas también ha reducido la velocidad implicando una duración de la maniobra mayor, y por tanto una mayor exposición al riesgo por colisión con los vehículos que circulan en sentido opuesto. Esta reducción de velocidad le ha generado una demora de 16 segundos respecto al escenario 1.

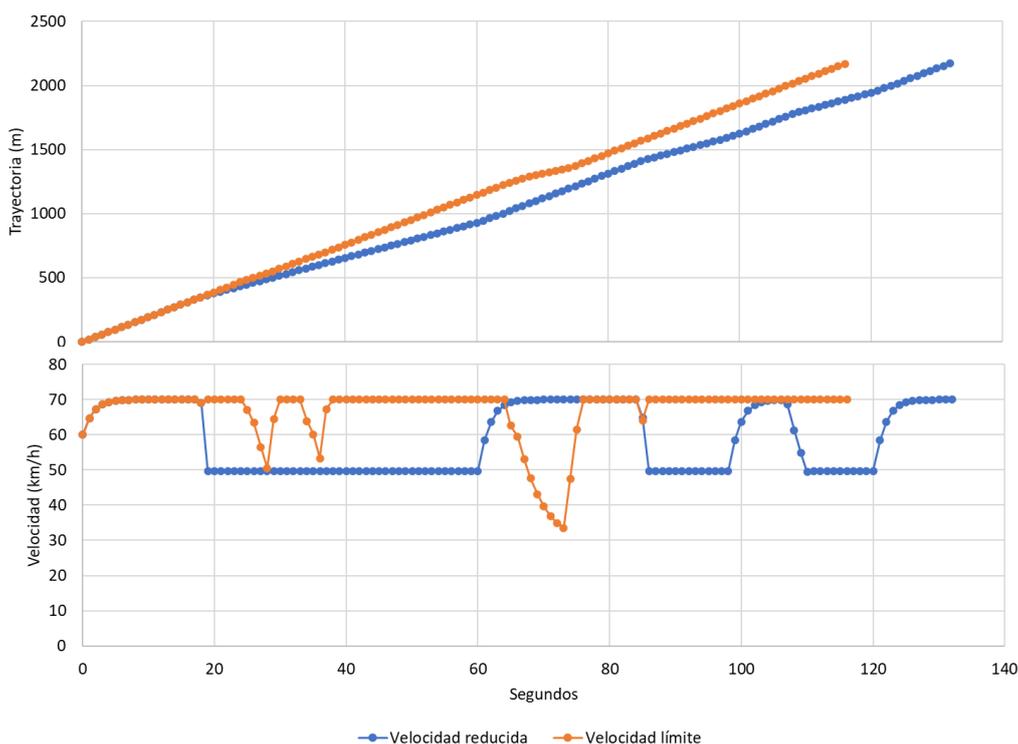


Figura 115. Trayectorias y velocidades de recorrido del tramo del vehículo 1 en los dos escenarios simulados.

Vehículo 2

En la Figura 116 en color naranja se representa la trayectoria y el diagrama de velocidades del vehículo 2 en el escenario 1 (en el que adelanta a los ciclistas a la velocidad límite de 70 km/h). En este caso el vehículo ha adelantado a dos ciclistas individuales, un grupo de 2, uno individual y un grupo de 10, en este orden. Los inicios de los adelantamientos se han producido en los tiempos 3 s, 11 s, 41 s, 61 s y 88 s. Antes de adelantar se ha realizado seguimiento al grupo de dos ciclistas y al siguiente individual.

En el segundo escenario, representado en la Figura 116 en color azul, el vehículo ha adelantado a los mismos grupos de ciclistas. Los adelantamientos en este caso se han iniciado en los tiempos 3 s, 43 s, 64 s, 94 s y 155 s. Se ha producido seguimiento previo en todos los adelantamientos menos en el primero. La reducción de velocidad para adelantar a ciclistas ha generado un tiempo de demora de 37 segundos a este vehículo respecto al escenario 1.

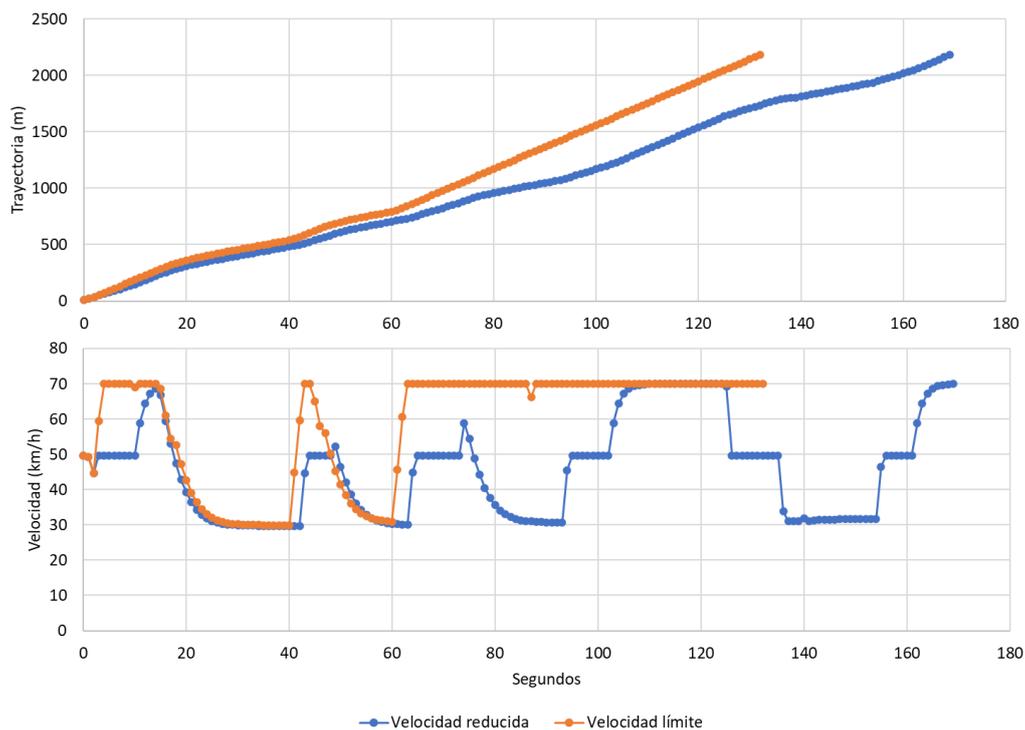


Figura 116. Trayectorias y velocidades de recorrido del tramo del vehículo 2 en los dos escenarios simulados.

Vehículo 3

Las trayectorias y velocidades del vehículo 3 se muestran en la Figura 117, correspondiendo a las líneas en naranja el escenario 1 y a las líneas en azul al escenario 2. El vehículo 3 adelanta a un ciclista individual, a un grupo de dos y a un grupo de 10 en los dos escenarios. En los dos casos entra al tramo en seguimiento de una bicicleta y la adelanta al inicio del tramo iniciando el adelantamiento en el tiempo 1s. En el escenario 1 tarda 4s en realizar este adelantamiento, mientras que en el escenario 2, aplicando la reducción de velocidad, tarda 7 s.

En el escenario 1 adelanta al grupo de dos ciclistas en el tiempo 11 s, y al grupo de 10 en el 68 s. Las duraciones de estos dos adelantamientos han sido de 5s y 7s respectivamente. En el escenario 2 realiza seguimiento al grupo de dos ciclistas y finalmente empieza el adelantamiento en el tiempo 23 s, mientras que inicia el adelantamiento al grupo de diez en el tiempo 83 s. En este escenario las duraciones de estos adelantamientos fueron de 7 s y 17 s. La reducción de velocidad durante el adelantamiento en 20 km/h ha supuesto un tiempo de demora para este vehículo de 13 s.

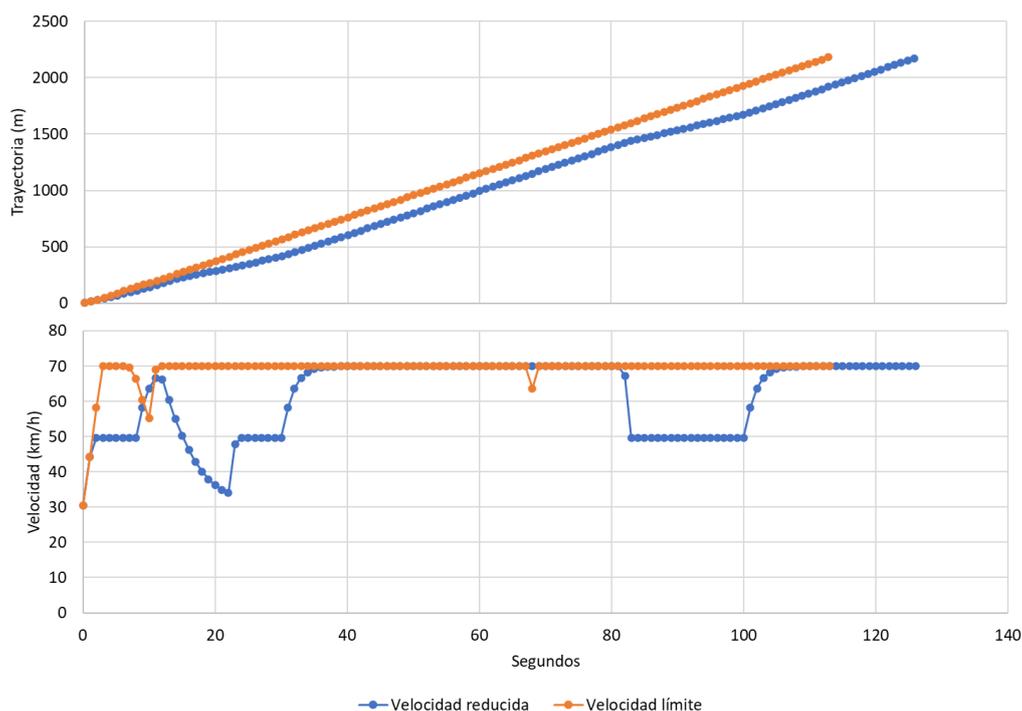


Figura 117. Trayectorias y velocidades de recorrido del tramo del vehículo 1 en los dos escenarios simulados.

5.3.3.3 Resumen del análisis de la variación de la velocidad límite durante el adelantamiento

A partir del análisis de los datos de maniobras de adelantamiento recogidos en campo mediante bicicletas instrumentadas se ha comprobado que una reducción de la velocidad durante el adelantamiento implica una mayor duración de la maniobra y una menor separación lateral entre el vehículo adelantante y el grupo de bicicletas.

Mediante el uso de un modelo de microsimulación del tráfico, debidamente calibrado y validado con datos de campo, se han simulado dos escenarios con características geométricas y de tráfico iguales. En el escenario 1 se ha permitido a los vehículos adelantar a las bicicletas a la velocidad límite de la carretera, y en el escenario 2 se ha limitado la velocidad durante el adelantamiento a ciclistas a 20 km/h menos de la velocidad límite.

Los resultados han mostrado que la aplicación de esta reducción en la velocidad ha generado una reducción en la velocidad media de recorrido del tramo de un 7%, un aumento en el tiempo de demora de un 23% y una reducción en el número de adelantamientos realizados por vehículo de un 12%. Esta medida también ha generado un aumento medio en las duraciones de los adelantamientos a los diferentes grupos de ciclistas de un 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.

Al reducir la velocidad durante el adelantamiento en 20 km/h se ha reducido el número de adelantamientos en un 12% y se ha aumentado la duración de los adelantamientos en un 56%. Sin embargo, es necesario realizar un análisis global ponderando estos dos factores para analizar la variación de la exposición al riesgo obtenida al aplicar esta medida. 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.

$$TER(s) = Duración\ promedio\ adelantamiento\ (s) * N^{\circ}\ adelantamientos/veh \quad (12)$$

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 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. Este porcentaje de exposición al riesgo se define en la ecuación 13.

$$\%ER = \left(\frac{TER}{TR} \right) * 100 \quad (13)$$

Estos valores de medidas subrogadas para el cálculo de la seguridad relativa a la exposición al riesgo por la circulación por el carril opuesto se han calculado para los escenarios considerando las condiciones actuales de velocidad límite del tramo y de reducción de velocidad durante el adelantamiento en 20 km/h.

El valor del tiempo de exposición al riesgo promedio por vehículo (TER) para la situación actual es de 38.94 s, mientras que el porcentaje de tiempo en el que un vehículo circula por el carril opuesto respecto del tiempo total de recorrido del tramo (%ER) es del 20%. Para el segundo escenario en el que se reduce la velocidad durante el adelantamiento a ciclistas el valor del TER es de 51.83 s, y el del %ER del 26%.

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.

5.3.4 Velocidad límite del tramo de carretera

Una de las medidas de gestión del tráfico más comunes en tramos de carretera convencional en los que circulan ciclistas, con el fin de reducir la velocidad durante las interacciones entre estos dos usuarios de la vía, es la reducción de la velocidad límite del tramo durante los periodos de máxima afluencia ciclista. Sin embargo, el efecto de esta medida sobre la funcionalidad del tráfico no ha sido investigada. En este apartado se analiza la afección de esta medida sobre las medidas que caracterizan la seguridad y la funcionalidad del tráfico mediante el uso del modelo de microsimulación del tráfico desarrollado en esta tesis.

Para desarrollar este estudio se utilizó el modelo de microsimulación correspondiente al tramo de carretera convencional estrecha, debidamente calibrado y validado con datos de campo. Se partió del escenario real, en el que la velocidad límite es de 70 km/h, y se diseñaron dos escenarios más, en los cuales se incorporaron dos reducciones de la velocidad límite. En el escenario 2 se redujo la velocidad límite en 10 km/h, siendo en este caso de 60 km/h. En el

escenario 3 la reducción fue de 20 km/h, resultando en una velocidad límite de 50 km/h, comparable a los tramos de travesía.

En la Tabla 77 se muestran los escenarios y las velocidades límite correspondientes.

Escenario	Reducción de la velocidad límite	Velocidad límite
Escenario 1	0 km/h	70 km/h
Escenario 2	10 km/h	60 km/h
Escenario 3	20 km/h	50 km/h

Tabla 77. Escenarios de reducción de la velocidad límite del tramo de carretera.

Se realizaron las simulaciones de estos tres escenarios considerando el mismo nivel de tráfico en todos ellos, para poder comparar el efecto de la reducción de la velocidad límite del tramo de carretera. El nivel de tráfico motorizado fue el correspondiente al observado durante el periodo de máxima demanda ciclista, mientras que el de bicicletas fue el doble del observado en este periodo, para forzar a que se realizasen un mayor número de interacciones entre usuarios. El tráfico simulado se muestra en la Tabla 74.

A nivel macroscópico, las medidas de desempeño que caracterizan la funcionalidad del tráfico se han visto afectadas al aplicar esta medida. Se han calculado los valores medios del tiempo de demora, de la velocidad media de recorrido y del número de adelantamientos realizados por cada vehículo ligero considerando todos los vehículos que han circulado por el segmento en el sentido de estudio. Los resultados obtenidos de las simulaciones de estos tres escenarios se muestran en la Tabla 78.

Escenario de velocidad límite	Tiempo de demora (s)	Velocidad media de recorrido (km/h)	Número de adelantamientos/veh
Velocidad límite de 70 km/h	40.41	53.93	6.20
Velocidad límite de 60 km/h	35.54	49.04	5.51
Velocidad límite de 50 km/h	25.92	43.68	4.37
Variación (70-60 km/h)	-	-9%	-11%
Variación (70-50 km/h)	-	-19%	-30%

Tabla 78. Medidas de desempeño a nivel macroscópico considerando los escenarios con velocidad límite del tramo de 70, 60 y 50 km/h, y variación entre los escenarios.

Los valores medios del tiempo de demora por vehículo ligero no son comparables entre los tres escenarios, ya que En Aimsun Next el tiempo de demora de un vehículo se calcula como la diferencia entre el tiempo de viaje esperado, considerado como el tiempo en que tardaría en recorrer el tramo en condiciones ideales, y el tiempo de viaje real. Por tanto, en cada uno de estos tres escenarios el tiempo de viaje ideal es distinto, ya que la velocidad deseada corresponde con la velocidad límite del tramo.

También se ha calculado el porcentaje de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo. Para el escenario con velocidad límite de 70 km/h ha resultado en un 24.5%, para el escenario con velocidad límite de 60 km/h ha resultado en un 20.4%, y para el escenario con velocidad límite de 50 km/h el valor obtenido fue del 13.7%. Estos valores indican que al reducir la velocidad límite del tramo de carretera la demora es menor, ya que los vehículos esperan circular a una velocidad más baja, igual a la límite. Sin embargo, el tiempo de recorrido del tramo en cada uno de ellos fue mayor a medida que se redujo el límite de velocidad.

La velocidad media de recorrido de los ligeros es menor para los escenarios con menor velocidad límite. La variación es proporcional a la reducción de velocidad límite en cada escenario.

En cuanto al número de adelantamientos realizados por vehículo, al reducir el límite de velocidad de los ligeros en el tramo, el número de adelantamientos realizados por vehículo ha descendido, ya que al ir más lentos interactúan con menos ciclistas. La reducción en el número de adelantamientos fue del 11% entre los escenarios con límite de velocidad de 70 km/h y 60 km/h, y del 30% entre los escenarios con límite de velocidad de 70 km/h y de 50 km/h.

En la Tabla 79 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.

Escenario de velocidad límite	Individual	2P	4P	10P
Velocidad límite de 70 km/h	5.31 s	6.03 s	6.14 s	7.00 s
Velocidad límite de 60 km/h	6.09 s	7.21 s	7.33 s	7.88 s
Velocidad límite de 50 km/h	7.60 s	8.75 s	9.07 s	10.69 s
Variación (70-60 km/h)	15%	19%	19%	13%
Variación (70-50 km/h)	43%	45%	48%	53%

Tabla 79. 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.

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 16% 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%.

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 Tabla 78.

La reducción de la velocidad límite de la carretera penaliza la funcionalidad del tráfico ya que se reduce la velocidad media de recorrido de los ligeros, aumentando la duración de los adelantamientos. Sin embargo, el número de adelantamientos realizados por vehículo se ve reducido, al interactuar cada vehículo con menos ciclistas ya que circula a una velocidad menor.

Sin embargo, esta medida está enfocada a aumentar la seguridad de los ciclistas, ya que los adelantamientos se realizarán a velocidades menores.

En cuanto a la seguridad de los conductores, la reducción del límite de velocidad supone duraciones mayores del adelantamiento, aumentando la exposición al riesgo de colisión frontal con los opuestos durante la invasión del carril contrario. Sin embargo, esta medida también supone una reducción del número de adelantamientos 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 tiempo de

exposición al riesgo promedio por vehículo (TER) y el porcentaje de tiempo de exposición al riesgo respecto al tiempo de recorrido del tramo (%ER) expresadas en las ecuaciones 12 y 13. El valor del TER calculado considerando la reducción de 20km/h en la velocidad límite del tramo de carretera resulta en 39.45 s, indicando que un vehículo debe de circular durante 39.45 s por el carril opuesto debido a las maniobras de adelantamiento a ciclistas realizadas. El valor del %ER resultó en un 17%, indicando que al aplicar esta medida cada vehículo circula durante un 17% del tiempo de recorrido del tramo por el carril opuesto, exponiéndose al riesgo de colisión frontal con los vehículos opuestos.

Capítulo 6

Discusión

Los resultados obtenidos en los diferentes apartados de esta investigación se han contrastado con los estudios realizados anteriormente en este ámbito, así como con las normativas que regulan la circulación de ciclistas y conductores. El proceso de discusión de resultados ha permitido asimismo el contraste de las hipótesis planteadas en esta investigación. Finalmente, con los resultados derivados del proceso de discusión se establecen las conclusiones presentadas en esta tesis.

6.1 Maniobra de adelantamiento a ciclistas

En este apartado se contrastan los resultados obtenidos mediante la metodología de tomas de datos con bicicletas instrumentadas desarrollada en esta investigación. Los datos no son comparables directamente con los obtenidos en investigaciones anteriores, debido a las diferencias en cuanto a la localización de los estudios y en cuanto al comportamiento de los usuarios de las vías. No obstante, se relacionaron estos resultados con los obtenidos en los estudios desarrollados en este ámbito (apartado 6.1.1).

En la presente investigación se ha realizado un análisis descriptivo de los resultados de las principales variables relativas a las maniobras de adelantamiento, recogidas mediante las bicicletas instrumentadas, según el tramo de estudio y la configuración del grupo de ciclistas adelantado.

Una de las variables más importantes desde el punto de vista de la seguridad y de la funcionalidad del tráfico es la duración del adelantamiento a los ciclistas. Duraciones mayores suponen un tiempo más elevado en el carril opuesto, durante el cual existe un peligro extremo (Asaithambi and Shrivani, 2017), mientras que duraciones muy cortas pueden suponer un riesgo para los ciclistas si se realizan a velocidades elevadas y/o separaciones laterales reducidas. Por tanto, la discusión de los resultados de las principales variables relativas a la maniobra de adelantamiento se centró en la duración del adelantamiento (apartado 6.1.2).

6.1.1 Caracterización de la maniobra de adelantamiento

La metodología de toma de datos utilizando las bicicletas instrumentadas ha proporcionado los datos necesarios para caracterizar la maniobra de adelantamiento a los diferentes grupos de ciclistas. El uso de bicicletas instrumentadas para recoger datos de las interacciones entre motorizado y ciclistas ha sido común en otros estudios (Beck et al., 2019; Chapman and Noyce, 2014; Chuang et al., 2013; Dozza et al., 2016; Garcia et al., 2020; Llorca et al., 2017; Mackenzie et al., 2021). Tal y como afirmaron Chuang et al. (2013), mediante este método fue posible recopilar datos reales de maniobras de adelantamiento con una alta validez ecológica. Sin embargo, este método requiere una muestra grande y un tiempo y esfuerzo considerables para la recopilación y el procesamiento de datos. Aunque la mayoría de las investigaciones anteriores estaban enfocadas al estudio de las separaciones laterales, se constata que esta metodología permite obtener un número elevado de variables relacionadas con el adelantamiento a ciclistas, por tanto, la hipótesis H1 ha sido corroborada.

En esta investigación se han registrado datos de maniobras de adelantamiento a ciclistas en diferentes tramos de carreteras convencionales, todos ellos con un límite de velocidad ≥ 60 km/h. Fraser and Meuleners (2020) analizaron los factores de riesgo asociados a eventos no seguros entre vehículos motorizados y grupos de ciclistas en Australia; una de sus principales conclusiones fue que tramos con velocidades límite ≥ 60 km/h incrementaron significativamente el riesgo de un evento no seguro. Este resultado, junto con las velocidades del vehículo adelantante registradas durante la maniobra de adelantamiento a ciclistas, y considerando el bajo nivel de protección de estos, reflejan el elevado riesgo que suponen las interacciones entre vehículos motorizados y ciclistas en carreteras convencionales.

En España, el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003) exige una separación lateral mínima de 1.5 m al adelantar a ciclistas. A partir de los datos de separaciones laterales, se calculó el porcentaje de adelantamientos en los que no se cumplió esta distancia mínima para cada tramo de carretera en los que se realizó el estudio y para cada configuración del grupo de ciclistas (Tabla 16 y Figura 60). García et al. (2015) calcularon las separaciones laterales durante el adelantamiento a un ciclista en 7 carreteras convencionales cercanas a València. Obtuvieron unos porcentajes de no cumplimiento del mínimo exigido entre el 15% y el 50%, dependiendo del tramo de estudio. Carreteras más estrechas supusieron mayores porcentajes de no cumplimiento de la separación lateral mínima, mientras que las carreteras con arcenes rojos presentaron valores de no cumplimiento superiores a los esperados. Llorca et al. (2017) obtuvieron un nivel de no cumplimiento de la normativa del 36% considerando un ciclista individual y 7 tramos de carretera convencional cercanos a València. En el presente estudio, considerando un ciclista circulando en solitario, el nivel de no cumplimiento fue del 21%, mientras que considerando todos los datos conjuntamente, el nivel de no cumplimiento de la separación mínima obtenido fue del 27%.

Estos datos indican un aumento en el cumplimiento de la normativa en los últimos años, corroborando la hipótesis H4. La carretera con arcenes rojos en el presente estudio presentó valores de separaciones laterales menores de las esperadas, coincidiendo con los estudios previos. Estos resultados indican que, en los últimos años, el porcentaje de cumplimiento de la separación lateral mínima durante el adelantamiento a ciclistas ha aumentado. Esto se debe al mejor conocimiento de la normativa por parte de los conductores y ciclistas. Según los datos obtenido por López et al. (2019) en una encuesta realizada a ciclistas de carretera en carreteras convencionales de la red española, los ciclistas mostraron elevados porcentajes del conocimiento de la normativa. Este incremento en el conocimiento de la normativa se ha producido en parte gracias a las campañas de información y de concienciación impulsadas por las Administraciones Públicas.

En cuanto a las alineaciones en planta donde se realizaron los adelantamientos, no se observó ninguna relación evidente con la configuración de los grupos de ciclistas, mostrando para todos los casos un mayor porcentaje de adelantamientos realizados en rectas. Sin embargo, en el grupo de 10 ciclistas en línea si se observó un menor porcentaje de adelantamientos realizados en curvas debido a su mayor longitud que supone una mayor distancia de visibilidad necesaria para adelantarles. Por tanto, la hipótesis H9 se acepta para pelotones formados por un número elevado de ciclistas.

En general, los valores de las velocidades del vehículo adelantante durante el adelantamiento fueron similares para todas las configuraciones de ciclistas estudiadas, siendo ligeramente superiores cuando los grupos circulaban en línea. Las separaciones laterales si presentaron diferencias entre las diferentes configuraciones de los grupos de ciclistas, siendo mayores

cuando los ciclistas circulaban en línea debido a que ocupan un menor volumen en la calzada. La hipótesis H6 queda refutada, ya que las diferencias se observan entre configuraciones en línea o en paralelo de los grupos, no entre grupos e individuales.

6.1.2 Modelo de duración del adelantamiento a ciclistas

La duración del adelantamiento a diferentes grupos de ciclistas es una variable fundamental en esta investigación, tanto desde el punto de vista de la seguridad como de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales. La discusión de los resultados obtenidos en el análisis de las duraciones del adelantamiento se realiza comparando las maniobras lanzadas con las realizadas a partir del seguimiento al grupo de ciclistas.

En los datos obtenidos a partir del análisis descriptivo de las maniobras de adelantamiento mostrados en la Tabla 17, se extraen algunas conclusiones que pueden ser comparadas con datos aportados por estudios anteriores. Las maniobras lanzadas fueron más predominantes (79%) que las que se realizaron a partir de un seguimiento previo al grupo de ciclistas (9%), indicando que, en la mayoría de los casos, los conductores pueden adelantar a los ciclistas sin tener que realizar un seguimiento previo antes de comenzar la maniobra. Las maniobras lanzadas son las preferidas por los conductores porque se realizan sin reducción de velocidad, por lo que penalizan menos la operación del tráfico.

En la mayoría de los estudios naturalísticos anteriores se registraron una mayoría de maniobras lanzadas a ciclistas circulando de forma individual (Dozza et al., 2016; Kovaceva et al., 2019). Las maniobras lanzadas se realizaron con velocidades del vehículo adelantante más elevadas y separaciones laterales más bajas, por lo que en general la duración de los adelantamientos fue más reducida que en las maniobras en seguimiento. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Dozza et al. (2016), Bianchi Piccinini et al. (2018) y Kovaceva et al. (2019), quienes concluyeron que las maniobras en seguimiento son más seguras que las lanzadas ya que se realizan a velocidades más bajas, y el conductor tiene un mejor control de la interacción con el vehículo que se aproxima y deja una mayor separación lateral con los ciclistas.

Los valores de duraciones del adelantamiento obtenidos en este estudio, considerando solo a un ciclista, coincidieron con los obtenidos por Dozza et al. (2016), quienes concluyeron que las maniobras en seguimiento demoraron más que las lanzadas. Asaithambi and Shravani (2017) realizaron un estudio de maniobras de adelantamiento en tráfico mixto en carreteras convencionales, y también obtuvieron mayores duraciones del adelantamiento para las maniobras en seguimiento que para las lanzadas.

Las maniobras lanzadas implicaron un menor porcentaje de invasión del carril contrario (77%) frente a las maniobras en seguimiento (93%); este hecho, además de la menor duración de los adelantamientos, demuestra que estas maniobras eran las preferidas por los conductores. Sin embargo, las maniobras lanzadas se realizaron a mayores velocidades y menores separaciones laterales, y presentaron un mayor porcentaje de presencia de vehículos en sentido contrario (31%) que las maniobras en seguimiento (20%). Estos últimos resultados enfatizan el peligro de las maniobras lanzadas para los ciclistas.

Las principales características geométricas de la vía asociadas a la duración del adelantamiento fueron los anchos de carril y arcén. En carreteras convencionales, los ciclistas circulan por el arcén o por el borde derecho del carril si el arcén es inexistente o intransitable. Para las maniobras lanzadas, el efecto del ancho del arcén fue mayor que el del ancho del carril, ya que el ancho del arcén controla la posición lateral del ciclista dentro del espacio seguro del

conductor. Investigaciones anteriores han demostrado que al considerar una superposición entre las trayectorias del vehículo adelantante y del ciclista en la fase de aproximación, las medidas de seguridad durante la maniobra se redujeron y los conductores prefirieron las maniobras en seguimiento (Rasch et al., 2020a).

Sin embargo, en carreteras convencionales sin carriles específicos para los ciclistas, considerar los anchos de carril y arcén por separado puede llevar a conclusiones erróneas ya que el espacio total donde interactúan los vehículos motorizados y las bicicletas está formado por los anchos del carril y arcén considerados conjuntamente. Por lo tanto, con respecto al efecto de los anchos de carril y arcén considerando conjuntos, y representado en el modelo M7FN, las carreteras convencionales más anchas presentaron menores duraciones de adelantamiento. En carreteras más anchas, los ciclistas circulan por el arcén, lo que facilita al conductor realizar la maniobra. Además, las carreteras convencionales más anchas generalmente presentaban una mayor separación lateral, como se verificó en varios estudios (Bella and Silvestri, 2017; Chapman and Noyce, 2014; Debnath et al., 2018; Feng et al., 2018; Llorca et al., 2017; Mecheri et al., 2020). El efecto del ancho del arcén no estaba claro en estudios previos (Dozza et al., 2016; García et al., 2015; Mecheri et al., 2020).

Sin embargo, los resultados de este estudio presentaron un fuerte efecto del ancho del arcén en la duración del adelantamiento, especialmente para las maniobras lanzadas, de modo que un arcén más ancho redujo la duración del adelantamiento. Un estudio realizado por Llorca et al. (2017) indicó que la provisión de arcones más anchos podría ser una medida adecuada para garantizar maniobras de adelantamiento seguras, considerando la mayor separación lateral que presentan. Además, al analizar las interacciones entre vehículos motorizados y ciclistas en carreteras convencionales, el espacio total donde interactúan debe considerarse como un todo (es decir, los anchos de carril y arcén conjuntamente). Por lo tanto, las carreteras más anchas, especialmente con arcones más anchos, ofrecen una mayor separación lateral y una menor duración de adelantamiento, por lo que pueden considerarse una contramedida segura desde el punto de vista del ciclista y del conductor.

El efecto del límite de velocidad y la IMD de la carretera tuvo el signo contrario para las maniobras lanzadas y las que se iniciaron desde el seguimiento a los ciclistas. Sin embargo, en las maniobras en seguimiento, el efecto de los parámetros relacionados con el tramo de la vía parece no tener relación con la duración del adelantamiento, como demuestra que el intervalo de credibilidad del 95% incluya el valor cero para el modelo de la duración del adelantamiento de este tipo de maniobras, esto se traduce en áreas sombreadas más amplias en la Figura 65.

En las maniobras en seguimiento, el adelantamiento generalmente comienza desde una velocidad baja del vehículo, ya que el vehículo seguía a las bicicletas, y la mayoría de las maniobras se realizaron sin un vehículo opuesto visible, explicando que el límite de velocidad y la IMD tuvieran un efecto débil en la duración. Rubie et al. (2020) indicaron que es potencialmente difícil interpretar los efectos de los límites de velocidad en las separaciones laterales, porque los límites de velocidad más altos no solo están asociados con velocidades más altas de los vehículos motorizados, sino también con diferentes tipos de carreteras, estrategias de adelantamiento y anchos de carriles. De hecho, el efecto del límite de velocidad es contrario a la velocidad del vehículo que adelanta para maniobras lanzadas en las observaciones realizadas en esta investigación. Mackenzie et al. (2021) obtuvo mayores separaciones laterales en carreteras con mayores límites de velocidad; este resultado concuerda con el obtenido en el presente estudio, ya que mayores separaciones laterales pueden estar relacionadas con mayores duraciones de adelantamiento. El límite de velocidad y la IMD de la carretera tienen un

efecto mayor en las maniobras lanzadas, no presentando relación con la duración del adelantamiento en las maniobras en seguimiento, por tanto, la hipótesis H8 queda refutada.

En cuanto a la configuración del grupo de ciclistas, en ambas estrategias de adelantamiento, un mayor número de ciclistas en el grupo produce una mayor duración del adelantamiento. Este resultado concuerda con Garcia et al. (2020) y Debnath et al. (2018), quienes obtuvieron para ciclistas individuales una separación lateral menor que para un grupo. El número de ciclistas en el grupo también influye en la elección de la estrategia, de manera que, con más ciclistas en el grupo, se observaron más maniobras en seguimiento.

En cuanto a la configuración del grupo, en las maniobras lanzadas, la configuración en paralelo presentó mayores duraciones del adelantamiento, ya que los ciclistas ocupan más espacio en el carril y el conductor tuvo que desplazarse más hacia el carril contrario. Sin embargo, en las maniobras en seguimiento, el efecto de la configuración en paralelo tuvo un efecto débil en la duración del adelantamiento, y cuando los ciclistas circularon en paralelo, se registraron duraciones de adelantamiento más bajas. Este hecho puede explicarse porque las maniobras en seguimiento comenzaron desde una velocidad baja del vehículo adelantante, y, por tanto, se necesitó menos tiempo para adelantar a una configuración circulando en paralelo debido a su menor longitud del grupo. Estos resultados permiten aceptar la primera parte de la hipótesis H7, pero no la segunda, por tanto, H7 se rechaza.

La alineación horizontal donde se realizaron las maniobras de adelantamiento tuvo un efecto débil en la duración del adelantamiento para las maniobras en seguimiento. En cambio, para las maniobras lanzadas, se registraron mayores duraciones de adelantamiento en rectas que en curvas, debido a la mayor visibilidad disponible en las secciones rectas. Este resultado coincide con Llorca et al. (2017), quienes obtuvieron mayores separaciones laterales y mayores velocidades durante el adelantamiento en tramos rectos en comparación con las curvas, pero es contrario a las conclusiones de Bella and Silvestri (2017). Estos resultados son contrarios a la hipótesis H10, por tanto, H10 se rechaza.

La presencia de tráfico opuesto se ha definido en los estudios realizados por Dozza et al. (2016), Bianchi Piccinini et al. (2018) y Rasch et al. (2020) como el principal factor que afecta las medidas de seguridad. Bianchi Piccinini et al. (2018) indicaron que los conductores que completaron la maniobra de adelantamiento sin esperar a que pasara un vehículo que venía en sentido opuesto redujeron sus márgenes mínimos de seguridad en las fases de acercamiento y adelantamiento. El mismo resultado fue obtenido por Rasch et al. (2020), quienes afirmaron que las medidas de seguridad durante toda la maniobra disminuyeron cuando el tiempo transcurrido hasta el vehículo que se aproximaba era corto.

Estos resultados concuerdan con el presente estudio donde se registraron duraciones más cortas del adelantamiento cuando un vehículo opuesto estaba presente para ambas estrategias. Sin embargo, el 80% de las maniobras en seguimiento se realizaron sin un vehículo opuesto presente, frente al 69% de las maniobras lanzadas, lo que demuestra que la presencia de un vehículo opuesto induce a más conductores a elegir la maniobra en seguimiento (Bianchi Piccinini et al., 2018); mientras que, en las maniobras en seguimiento, los conductores suelen esperar a que pase el vehículo opuesto para iniciar la maniobra. En las maniobras en seguimiento se inició el adelantamiento con un vehículo opuesto visible en el 20% de los casos, mientras que en las maniobras lanzadas en un 31% de los casos existía un opuesto visible durante el adelantamiento. Por tanto, la hipótesis H11 se acepta.

La velocidad del vehículo adelantante y la separación lateral tuvieron el mismo efecto en ambas estrategias. Se observaron mayores duraciones del adelantamiento con menores velocidades del vehículo adelantante, y con mayores separaciones laterales. Sin embargo, para las maniobras lanzadas, se obtuvo un valor medio más alto y un intervalo de credibilidad más estrecho del parámetro de separación lateral, lo que indica un fuerte efecto de la separación lateral sobre la duración del adelantamiento para este tipo de maniobras. Estos resultados concuerdan con Bella y Gulisano (2020), quienes analizaron la maniobra de adelantamiento realizada por motocicletas, obteniendo mayores duraciones del adelantamiento cuando se presentaron mayores distancias laterales y menores diferencias de velocidad. Llorca et al. (2017) y López et al. (2020) constataron que la percepción subjetiva del riesgo de los ciclistas estaba relacionada con la combinación de velocidad de adelantamiento y separación lateral durante la maniobra de adelantamiento.

A la vista de los resultados obtenidos, se corrobora la hipótesis H2, ya que las maniobras de adelantamiento lanzadas fueron más predominantes que las realizadas desde el seguimiento de los ciclistas, se realizaron a velocidades mayores y separaciones laterales menores, presentando duraciones menores del adelantamiento. En carreteras estrechas el porcentaje de maniobras en seguimiento fue mayor. El ancho de carril y arcén debe de considerarse conjuntamente, ya que es el espacio total en el que los ciclistas y los conductores interactúan. Carreteras más anchas presentaron una duración menor del adelantamiento, además de una mayor separación lateral.

Las carreteras más estrechas presentaron un porcentaje de invasión del carril opuesto mayor que las carreteras con secciones más favorables, corroborando la hipótesis H3.

Los modelos de duración del adelantamiento desarrollados en esta investigación han permitido analizar el efecto de las diversas variables que caracterizan las maniobras de adelantamiento entre ciclistas y conductores, y el efecto de las mismas ha sido contrastado y está en línea con los resultados obtenidos en otras investigaciones. Asimismo, los modelos desarrollados pueden ser utilizados para obtener valores predictivos considerando otras configuraciones de agrupación de ciclistas. Estas predicciones se pueden utilizar como entrada a los modelos de microsimulación de tráfico, para calibrar las longitudes efectivas de otros grupos de ciclistas diferentes a los observados, aumentando la validez de los estudios de microsimulación.

6.2 Funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas

Los estudios anteriores, relacionados con el nivel de servicio de bicicletas, encontrados en la literatura se basaban principalmente en niveles de servicio considerando las percepciones de confort de los usuarios ciclistas (Kazemzadeh et al., 2020), estando la mayoría de estos estudios enfocados en ámbito urbano. En la revisión de la literatura disponible hasta la fecha, no se encontró ningún estudio que analizase la posible afección sobre la funcionalidad del tráfico causada específicamente por la presencia de ciclistas en las carreteras convencionales.

Por tanto, en este apartado se relacionan los resultados obtenidos con otros estudios de funcionalidad del tráfico, pero no relacionados con la influencia de la circulación de ciclistas por estas vías. Finalmente, se realiza una discusión de las principales medidas de desempeño utilizadas para caracterizar la funcionalidad del tráfico y de su relación con el nivel de tráfico ciclista existente en la carretera.

6.2.1 Datos en extremos del tramo de estudio

Las tomas de datos mediante grabaciones simultáneas en los extremos del tramo de estudio han permitido caracterizar el tráfico durante el periodo observado, y han permitido el cálculo de escenarios de intensidades horarias equivalentes de tráfico tanto motorizado como ciclista.

Esta metodología de toma de datos ha sido utilizada en investigaciones anteriores para caracterizar el tráfico. Moreno et al. (2014) realizaron un estudio para caracterizar diferentes medidas de desempeño del tráfico obtenidas a partir de observaciones en campo. En su estudio utilizaron una metodología de toma de datos muy similar a la utilizada en este estudio, realizando grabaciones con videocámaras de alta definición en el inicio y en el fin de zonas de adelantamiento permitido.

Para conseguir datos naturalísticos, las cámaras se situaron estratégicamente para no ser percibidas por los usuarios de la vía, y por tanto no alterar su comportamiento natural. La toma de datos y su posterior reducción fueron muy similares a las llevadas a cabo en la presente investigación, obteniendo en los dos casos variables que permitieron caracterizar la funcionalidad del tráfico en estas vías. Moll and García (2019) utilizaron esta misma metodología de toma de datos para caracterizar el tráfico en tramos de carreteras 2+1 en Barcelona. Estos dos estudios constatan la validez de esta metodología de toma de datos para caracterizar el tráfico en tramos de carretera, permitiendo la obtención de escenarios de tráfico y de medidas de desempeño que permitan caracterizar la funcionalidad del tráfico en las condiciones observadas.

En el presente estudio la metodología de reducción de datos ha sido adaptada a la circulación de ciclistas, registrando datos específicos de los grupos ciclistas, como el número de ciclistas que los componen y su configuración en línea y en paralelo. A partir de observaciones naturalísticas en los extremos de los tramos de estudio se comprobó que los pelotones circulaban como un solo vehículo, manteniendo su configuración durante todo el recorrido. Sin embargo, en tramos con pendiente este comportamiento no se mantiene. De esta manera la hipótesis H12 se acepta.

A partir de las observaciones de circulación de los grupos ciclistas realizadas en diferentes tramos de carretera, se puede concluir que, en las secciones más desfavorables, con arcenes nulos o estrechos, los grupos de ciclistas circularon generalmente en paralelo, mientras que, en secciones más favorables, con arcenes mayores de 1.5 metros transitables por los ciclistas, estos circularon por el arcén, y cuando lo hicieron en grupo circularon mayoritariamente en línea. Sin embargo, las configuraciones en las que circulan los ciclistas no dependen solamente de la sección de la carretera, también dependen de la intensidad del tráfico existente y de otros factores relacionados con el tráfico y la geometría de la carretera. Por tanto, la hipótesis H5 se rechaza.

Por otra parte, a partir de observaciones en campo y de la posterior reducción y tratamiento de los datos, se ha comprobado que la presencia de ciclistas reduce la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados, corroborando así la hipótesis H13.

Sin embargo, los datos obtenidos no permiten realizar un análisis completo, ya que, por una parte, los escenarios de tráfico observados son limitados y no cubren un rango suficiente de tráfico y, por otra parte, como se ha mostrado con los resultados obtenidos en la presente investigación, las medidas de desempeño medibles mediante esta metodología no permiten caracterizar el fenómeno a nivel microscópico.

6.2.2 Modelo de microsimulación del tráfico

Los modelos de microsimulación han sido ampliamente utilizados en investigaciones para representar y analizar el comportamiento de usuarios con diversos fines (Appiah et al., 2020; Makridis et al., 2020). En esta tesis se ha utilizado el software de microsimulación del tráfico Aimsun Next, en su versión 20.0.3. Aimsun Next dispone de un módulo que permite simular adelantamientos entre vehículos motorizados en carreteras convencionales, que fue desarrollado por Llorca et al. (2015) utilizando datos observados en carreteras españolas.

Esta tesis se ha basado en ese módulo, adaptándolo para poder simular la circulación de bicicletas, tanto individuales como en grupo, y sus interacciones con los vehículos motorizados. Las adaptaciones realizadas no han influido en el comportamiento de los motorizados a la hora de interactuar entre ellos, ya que se pretende simular el comportamiento de una carretera convencional con presencia de ciclistas y de motorizados, y estos últimos también deben de interactuar entre ellos. La adaptación del modelo de adelantamientos en el microsimulador se ha realizado en base a los datos observados mediante las dos metodologías descritas en esta investigación.

Aimsun Next permite simular comportamientos de usuarios no basados en el carril. Sin embargo, en la versión actual de Aimsun Next no son compatibles los modelos bidireccional y bidimensional, por tanto, en carreteras convencionales no es posible simular directamente los adelantamientos a ciclistas en los que se realiza una invasión parcial del carril opuesto. En esta investigación se ha incorporado este comportamiento en el modelo de microsimulación de tráfico bidireccional introduciendo el concepto de longitud equivalente de los grupos de ciclistas, y calibrando esta longitud equivalente a partir de las duraciones de los adelantamientos observadas.

La versión Aimsun Next 20 incorpora una mejora que permite adelantar a vehículos lentos incluso en línea continua. Esta mejora permite simular correctamente el comportamiento observado en los adelantamientos a ciclistas, y que a su vez está contemplado en el Reglamento General de Circulación (Ministerio del Interior, 2003). Otra mejora incorporada al modelo inicial fue la posibilidad de realizar adelantamientos a los ciclistas con duraciones menores que a los vehículos motorizados, permitiendo realizar el adelantamiento en solamente dos pasos de simulación. Esta mejora se incorporó por la necesidad de conseguir duraciones de los adelantamientos menores de 4 s, sobre todo en el tramo de carretera de la CV-310. Para discretizar entre ciclistas y motorizados a la hora de aplicar esta reducción en la duración del adelantamiento se utilizó el ancho de los usuarios en relación con el del carril. Las modificaciones incorporadas para integrar el tráfico ciclista, y su interacción con el motorizado, en Aimsun Next se realizaron gracias a la colaboración del equipo de Aimsun Next.

El modelo adaptado fue calibrado y validado con datos observados a nivel microscópico y a nivel macroscópico. Los resultados de los procesos de calibración y validación del modelo confirmaron el correcto funcionamiento del modelo con estas modificaciones. Sin embargo, la afección sobre la funcionalidad del tráfico de la presencia de ciclistas depende de las características de cada tramo de carretera, siendo necesario modelizar más tramos con características diferentes para poder ampliar las conclusiones de esta investigación.

A partir del modelo de duración del adelantamiento desarrollado en esta tesis es posible obtener predicciones de duraciones considerando otros grupos de ciclistas y variando las características de la carretera. Por tanto, para modelar nuevos tramos de carretera en Aimsun Next, solamente será necesario obtener datos geométricos del tramo y datos de tráfico a nivel macroscópico.

6.2.3 Sensibilidad de las medidas de desempeño a variaciones en el tráfico ciclista

En este apartado se realiza una discusión de los resultados de las principales medidas de desempeño utilizadas para caracterizar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas, a partir de un análisis de sensibilidad para determinar el impacto sobre cada medida de desempeño que tienen las variaciones en la demanda ciclista.

Se utilizaron los valores resultados de las simulaciones de los diferentes escenarios de tráfico motorizado y ciclista descritos en el apartado 1.2.3.3 del capítulo de análisis de resultados. En ellos están incorporados todos los datos obtenidos de las simulaciones, tanto de las configuraciones en paralelo como en línea de los grupos de ciclistas, ya que no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones.

Las medidas de desempeño analizadas en este apartado fueron:

- La velocidad media de recorrido del tramo de los vehículos ligeros (Vmr).
- La demora de los vehículos ligeros (D).
- El porcentaje de demora respecto del tiempo de recorrido del tramo $\%(D/T)$.
- El porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo (%VC).
- El número de adelantamientos realizados por vehículo ligero (Adel/veh).
- La densidad de ligeros seguidores en la salida del tramo (FD).

Se consideraron cuatro variaciones en la demanda ciclista:

- De 0% de ciclistas al 50% de la demanda ciclista máxima observada.
- Del 0% de ciclistas al 100% de la demanda ciclista máxima observada.
- Del 100% al 200% de la demanda ciclista máxima observada.
- Del 200% al 300% de la demanda ciclista máxima observada.

Las dos primeras variaciones representan el efecto de la incorporación de ciclistas en el tramo de carretera desde el estado de tráfico sin ciclistas; concretamente, la primera variación representa el efecto de incorporar una demanda ciclista media, mientras que la segunda variación representa el efecto de incorporar una demanda ciclista máxima observada en un día normal. Las dos últimas variaciones de demanda ciclista analizadas representan el efecto que supone incorporar un aumento de la demanda ciclista respecto un escenario en el que ya existen ciclistas circulando en el tramo de carretera. La tercera variación representa particularmente el efecto de un aumento del doble de la demanda ciclista desde el escenario de tráfico ciclista máximo observado. La última variación de demanda ciclista representa el efecto de un aumento de la demanda ciclista desde un escenario de tráfico ciclista ya por si elevado.

Para poder comparar la sensibilidad de cada medida de desempeño se calculó la tasa de variación porcentual de cada una de ellas para las mismas variaciones de la demanda ciclista. Las tasas de variación se han calculado para los dos tramos de carretera en los que se ha desarrollado el estudio, y considerando independientemente los tres niveles de tráfico motorizado particulares de cada tramo de carretera. La tasa de variación porcentual representa la variación registrada entre los dos niveles de demanda ciclista respecto del nivel de menor demanda en cada caso (ecuación 14).

$$TV = \frac{(V_f - V_i)}{V_i} * 100 \quad (14)$$

Donde:

TV es la tasa de variación porcentual entre dos escenarios de demanda ciclista.

V_f es el valor de la medida de desempeño en el escenario final de demanda ciclista.
 V_i es el valor de la medida de desempeño en el escenario inicial de demanda ciclista.

La Tabla 80 muestra los valores obtenidos para las seis medidas de desempeño calculadas para el tramo de la carretera CV-502, considerando los tres escenarios de tráfico motorizado y para cada uno de ellos las cuatro variaciones de demanda ciclista.

	Variación de la demanda ciclista	Vmr	D	%(D/T)	%VC	Adel/veh	FD
M1	0% a 50%	-5%	639%	578%	47%	1007%	52%
	0% a 100%	-13%	1675%	1358%	130%	1727%	161%
	100% a 200%	-13%	111%	82%	56%	43%	81%
	200% a 300%	-11%	44%	30%	23%	5%	42%
M2	0% a 50%	-18%	603%	441%	45%	781%	75%
	0 a 100%	-28%	1004%	653%	69%	1230%	132%
	100% a 200%	-11%	36%	22%	8%	39%	20%
	200% a 300%	-7%	16%	9%	6%	4%	17%
M3	0% a 50%	-30%	553%	328%	25%	596%	102%
	0 a 100%	-39%	752%	401%	29%	1095%	138%
	100% a 200%	-8%	15%	8%	0%	48%	5%
	200% a 300%	-2%	4%	2%	0%	15%	1%

Tabla 80. Tasa de variación porcentual de cada medida de desempeño respecto a variaciones en la demanda ciclista para los tres niveles de tráfico motorizado en el tramo de la CV-502.

En los valores correspondientes al tráfico real observado M1 se observa que, al introducir una demanda media de ciclistas, pasando del escenario sin ningún ciclista hasta el 50% de demanda ciclista, las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento a los ciclistas han sufrido las mayores variaciones, mientras que la velocidad media de recorrido de los ligeros ha presentado una reducción de solamente el 5%. Las medidas de desempeño más sensibles a esta variación en la demanda ciclista han sido el número de adelantamientos realizados, la demora y el porcentaje de demora respecto el tiempo de viaje de los ligeros.

En la segunda variación de demanda ciclista analizada, donde se pasa de ningún ciclista al 100% del máximo observado, se observó el mismo comportamiento que en la variación de demanda ciclista anterior. En este caso, las variaciones son más elevadas, ya que el tráfico ciclista introducido en el tramo es el doble.

Para los dos casos restantes de variaciones de demanda ciclista, correspondientes a aumentos de la demanda ciclista a partir de escenarios en los que ya circulaban ciclistas, las variaciones en las medidas de desempeño han sido menores, presentando también una afección mayor las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento. En estos casos, los adelantamientos realizados no han presentado una variación elevada, siendo la densidad seguidores en la salida del tramo junto con la demora las más sensibles al aumento de la demanda ciclista a partir de demandas ciclistas elevadas.

En general, para el nivel de tráfico motorizado observado M1, las medidas de desempeño presentaron una mayor sensibilidad al incorporar ciclistas en el tramo respecto del escenario sin ciclistas, mientras que cuando se alcanza una cierta demanda ciclista, los aumentos de ciclistas en el tramo suponen variaciones menores en las medidas de desempeño. La velocidad media de recorrido del tramo es la medida de desempeño que presentó una menor variación respecto a variaciones en la demanda ciclista. Las medidas de desempeño más sensibles a variaciones en la demanda ciclista fueron los adelantamientos realizados y la demora de los ligeros.

Los resultados relativos al nivel de tráfico motorizado medio-alto M2 mostraron tasas de variación porcentual de las medidas de desempeño en general menores que las presentadas en el nivel de motorizados menor (M1). La primera variación de demanda ciclista analizada corresponde a la introducción de una demanda ciclista media (50%) a partir de un escenario sin ciclistas. En este caso, la medida de desempeño que mayor variación ha presentado ha sido el número de adelantamientos por vehículo, seguida de la demora y del porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje. El porcentaje de vehículos en cola y la densidad de seguidores a la salida del tramo han sufrido una variación ligeramente menor, ya que en este caso el tramo soporta una mayor demanda motorizada. Para la segunda variación de la demanda ciclista, correspondiente a pasar del escenario sin ciclistas al del 100% de la máxima demanda observada, el efecto sobre las diferentes medidas de desempeño es similar al descrito en la incorporación del 50% de la demanda ciclista, sin embargo, al tratarse de una variación mayor de la demanda, las medidas de desempeño han presentado unas tasas de variación superiores. Las dos últimas variaciones de demanda ciclista representadas, correspondientes a pasar del 100% al 200%, y del 200% al 300%, han presentado variaciones en las medidas de desempeño menores que las descritas anteriormente.

Finalmente, los resultados obtenidos en el nivel de tráfico M3 relativo a una demanda motorizada elevada también se muestran en la Tabla 80. En este caso las variaciones registradas en las medidas de desempeño para las cuatro variaciones de demanda ciclista han sido menores que las presentadas en los escenarios de tráfico motorizado M1 y M2. El número de adelantamientos realizado por vehículo motorizado ha presentado la mayor variación, seguido de la demora y el porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje.

Por tanto, para el tramo de carretera estrecha, correspondiente a la CV-502, la incorporación de demanda ciclista en el tramo, tanto media como más elevada, supone que se realicen más adelantamientos, generando demoras en los ligeros al interactuar con los ciclistas. Esto es debido a que los ciclistas presentan un obstáculo en la circulación de los motorizados a causa de su reducida velocidad de circulación.

Las medidas de desempeño más sensibles a la variación en la demanda ciclista han sido el número de adelantamiento registrados por vehículo y las relacionadas con la demora de los ligeros. Las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios a la salida del tramo han sufrido una variación menor, mientras que la velocidad media de los ligeros se ha visto menos afectada.

En general, cuando el nivel del tráfico motorizado presente en el tramo fue más elevado, las medidas de desempeño presentaron una menor sensibilidad a variaciones en la demanda ciclista, siendo más complicado adelantar a los ciclistas debido a la menor existencia de huecos en el sentido opuesto, en este caso, las medidas de desempeño ya presentaban valores desfavorables debido al propio tráfico motorizado.

La Tabla 81 muestra la tasa de variación de las medidas de desempeño respecto a las cuatro variaciones en la demanda ciclista descritas anteriormente para el tramo de carretera de la CV-310.

	Variación de la demanda ciclista	Vmr	D	%(D/T)	%VC	Adel/veh	FD
M1	0% a 50%	-5%	630%	530%	32%	2531%	40%
	0% a 100%	-12%	1737%	1368%	81%	4118%	114%
	100% a 200%	-14%	115%	85%	51%	24%	87%
	200% a 300%	-12%	48%	31%	18%	-8%	40%
M2	0% a 50%	-8%	642%	532%	27%	1949%	37%
	0 a 100%	-15%	1414%	1078%	58%	3168%	90%
	100% a 200%	-15%	93%	66%	32%	19%	60%
	200% a 300%	-12%	43%	26%	13%	-15%	32%
M3	0% a 50%	-16%	834%	625%	24%	1470%	41%
	0 a 100%	-24%	1345%	923%	40%	2085%	80%
	100% a 200%	-13%	51%	32%	10%	18%	27%
	200% a 300%	-7%	21%	12%	5%	-9%	16%

Tabla 81. Tasa de variación porcentual de cada medida de desempeño respecto a variaciones en la demanda ciclista para los tres niveles de tráfico motorizado en el tramo de la CV-310.

Las medidas de desempeño correspondientes al nivel de tráfico motorizado observado M1 se muestran en la parte superior de la tabla. En la primera variación de demanda ciclista analizada, correspondiente a introducir un 50% de demanda ciclista a partir del escenario sin ciclistas, la velocidad media de recorrido de los ligeros ha presentado la menor variación, resultando en una reducción del 5%, mientras que las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios (%VC y FD) han presentado variaciones un poco más elevadas, del 32% y del 40% respectivamente. La medida de desempeño más sensible a la presencia de ciclistas en el tramo ha sido el número de adelantamientos realizados por vehículo ligero, presentando una variación del 2,531%, seguida de lejos por las medidas relacionadas con la demora de los ligeros, presentando unas tasas de variación del 630% la demora y del 530% el porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje.

En la segunda variación de la demanda de ciclistas, en la que se ha pasado del escenario sin ciclistas al 100% de la demanda máxima observada, las variaciones de las medidas de desempeño han presentado el mismo comportamiento. En este caso las variaciones fueron superiores debido a que se incorporaron el doble de ciclistas.

Las dos últimas variaciones de demanda ciclista corresponden a aumentos de demanda ciclista respecto a escenarios en los que ya circulaban ciclistas en el tramo de carretera. En estos casos las variaciones de las medidas de desempeño fueron menores, la variación en el número de adelantamientos presentó valores reducidos, llegando a tomar valores negativos, representando una reducción de los adelantamientos, en el caso de variación de la demanda ciclista del 200% al 300%. Al aumentar la demanda ciclista a partir de un escenario de demanda ciclista elevado las medidas de desempeño que presentaron una mayor variación fueron las relacionadas con la demora y con el seguimiento entre usuarios.

En general, para el nivel de tráfico M1, las medidas de desempeño presentaron mayores variaciones al incorporar ciclistas en el tramo respecto a la situación sin ciclistas, que al aumentar la demanda ciclista desde un escenario en el que ya circulaban ciclistas. La velocidad media de recorrido fue la medida de desempeño menos sensible respecto a la variación de la demanda ciclista, mientras que el número de adelantamiento por vehículo fue la medida más sensible a variaciones en la demanda ciclista. Las medidas de desempeño relacionadas con la demora de los ligeros presentaron variaciones elevadas, mientras que las relacionadas con el seguimiento entre usuarios, %VC y FD, presentaron una sensibilidad menor que estas.

Los resultados obtenidos para el nivel de tráfico motorizado M2, correspondiente a la IMD de la carretera según el Libro de Aforos del 2019, se representan en la parte central de la Tabla 81. Este nivel de tráfico es ligeramente más elevado que el M1. En este caso se observa el mismo comportamiento en las variaciones de cada medida de desempeño que en el escenario de motorizados M1. La velocidad media de recorrido ha sido en todos los casos la menos sensible a variaciones en la demanda ciclista. La medida que ha presentado una mayor sensibilidad ha sido el número de adelantamientos por vehículo, alcanzando una tasa de variación del 3168% al aumentar la demanda ciclista del 0% al 100% de la observada. Las medidas de desempeño relacionadas con la demora de los vehículos ligeros (D y %D/T), también han presentado tasas de variación elevadas, mientras que las medidas relacionadas con el seguimiento entre usuarios (%VC y FD) han presentado una menor sensibilidad que las anteriores a la incorporación de ciclistas en el tramo. Aumentos de la demanda ciclistas a partir de escenarios con demandas ciclistas elevadas han generado menores tasas de variación para todas las medidas de desempeño.

La parte inferior de la Tabla 81 representa las variaciones de las medidas de desempeño analizadas respecto a las cuatro variaciones en la demanda ciclista para el nivel de tráfico motorizado más elevado M3. Este nivel de tráfico representa el doble de la IMD de este tramo de carretera. Se observa el mismo comportamiento en la tasa de variación de cada variable observado en los otros escenarios de tráfico motorizado para este tramo de carretera. En este escenario de tráfico motorizado elevado el porcentaje de vehículos en cola y la densidad de seguidores a la salida del tramo han presentado una variación menor, debido a que en el escenario sin ciclistas estas medidas de desempeño ya presentaban valores elevados. Al igual que en los dos escenarios de tráfico motorizados anteriores, el número de adelantamientos realizados por vehículo ha presentado una sensibilidad mayor a la variación en la demanda ciclista, sobre todo en las variaciones de ningún ciclista al 50% y al 100% de la demanda ciclista. Las segundas medidas de desempeño que han presentado una tasa de variación elevada han sido las relacionadas con la demora de los ligeros (D y %D/T), mientras que las medidas relacionadas con el seguimiento entre usuarios a la salida del tramo han presentado variaciones menores. En este caso, la velocidad media de recorrido de los ligeros ha presentado la menor sensibilidad a variaciones en la demanda ciclista.

Los resultados obtenidos en los dos tramos de estudio en cuanto al análisis de sensibilidad de las medidas de desempeño respecto a variaciones en la demanda ciclista son similares. La medida de desempeño que ha presentado una mayor sensibilidad a la incorporación de ciclistas en el tramo ha sido en todos los casos el número de adelantamientos realizados por vehículo ligero, seguida por las medidas relacionadas con la demora de los ligeros, presentando una tasa de variación ligeramente superior la demora que el porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje. Las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios han presentado unas tasas de variación menores que las medidas anteriores, presentando una mayor sensibilidad la densidad de seguidores que el porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo. La velocidad media de recorrido de los ligeros ha sido la menos sensible a la incorporación de ciclistas en el tramo para todos los casos analizados. A la vista de estos resultados se corrobora la hipótesis H14.

El análisis realizado muestra que la presencia de ciclistas afecta a la funcionalidad del tráfico principalmente por la diferencia de velocidades entre estos usuarios y los vehículos motorizados, aumentando la necesidad de realizar adelantamientos y generando demoras en los vehículos ligeros debidas al seguimiento previo al adelantamiento. Estas demoras no afectan

en exceso a la velocidad media de recorrido de los ligeros, siendo esta la medida de desempeño que se ha visto afectada en menor medida por la presencia de ciclistas en el tramo, y a pesar de ser una medida fácilmente medible en campo, presenta poca relación con la percepción de los usuarios de la carretera sobre la calidad del tráfico (Al-Kaisy et al., 2018).

Al aumentar el nivel de tráfico motorizado en estos dos tramos, las medidas de desempeño analizadas presentan variaciones menores debidas a la presencia de ciclistas en el tramo. Esto se debe a que el propio tráfico motorizado ya supone unos valores elevados de estas medidas de desempeño. Sin embargo, la afección de los ciclistas sigue la misma línea que en los escenarios con menor tráfico motorizado.

En cuanto a las diferencias observadas entre los dos tramos de carretera, los valores no son comparables entre sí, ya que cada tramo tiene unas características geométricas y de tráfico diferentes. Sin embargo, se observa que, en el tramo de carretera estrecha, correspondiente a la CV-502, para tráfico motorizado medio, las diferencias entre las tasas de variación del número de adelantamientos y las medidas relacionadas con la demora son menores que las registradas en la carretera más ancha, correspondiente a la CV-310. Esto se traduce en que en carreteras estrechas el número de adelantamientos es menos elevado que en carreteras más anchas, generando más demora en los vehículos ligeros.

Estos resultados coinciden en parte con los obtenidos por Moreno et al. (2014), quienes evaluaron las medidas de desempeño obtenidas a partir de observaciones en carreteras convencionales españolas, considerando solamente tráfico motorizado. Los autores de ese estudio concluyeron que las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento presentaban mayores correlaciones con las variables de tráfico que las relacionadas con la velocidad. Sin embargo, estos autores no analizaron el número de adelantamientos por vehículo ni las medidas de desempeño relacionadas con la demora.

Al-Kaisy et al. (2018) realizaron una revisión de medidas de desempeño e indicadores utilizados para caracterizar la operación del tráfico en carreteras convencionales a partir del cumplimiento de una serie de criterios que debe cumplir una medida de desempeño ideal definidos por Luttinen (2001). Sus conclusiones fueron que es difícil encontrar una medida de desempeño que satisfaga todos los criterios, siendo aconsejable utilizar varias medidas de desempeño para describir la operación en carreteras convencionales. En el caso de tráfico ciclista, también es necesario utilizar varias medidas de desempeño para caracterizar correctamente la afección a la operación del tráfico.

6.2.4 Configuración de los grupos de ciclistas

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.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se ha comprobado que la configuración de los grupos de ciclistas en línea o en paralelo no influye significativamente en ninguna de las medidas de desempeño analizadas, solamente en el tramo de estudio relativo a una carretera estrecha se han obtenido diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones de los grupos en cuanto al número de adelantamientos realizados por vehículo ligero. En este caso la configuración de los grupos en paralelo presentó un mayor número de adelantamientos registrados. Este resultado indica que, 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. Este resultado está en línea con el resultado obtenido por López et al. (2019), quienes realizaron una encuesta en la que preguntaron las preferencias sobre la circulación en grupos a ciclistas de carretera en España. La encuesta fue realizada por 523 ciclistas de carretera, de ellos, el 78.3% indicó que prefiere la circulación de grupos en paralelo. Sin embargo, la normativa indica que los grupos de ciclistas deben circular en hilera en tramos sin visibilidad y cuando formen aglomeraciones de tráfico (Ministerio del Interior, 2003). Estos resultados corroboran la hipótesis H15.

Fraser and Meuleners (2020) realizaron un estudio de eventos no seguros registrados entre vehículos motorizados y grupos de ciclistas en Australia, concluyendo que cuando los grupos circulaban en paralelo se redujo el riesgo de eventos no seguros respecto a cuando circularon en línea. López et al. (2020) registraron un mayor porcentaje de maniobras en seguimiento para los grupos de ciclistas que circulaban en paralelo (19%), comparado con la configuración en línea (8%). Es evidente que cuando los grupos de ciclistas circulan en paralelo son más visibles por parte de los conductores debido al mayor volumen de ocupación de la calzada. Esta mayor visibilidad del grupo de ciclistas puede suponer interacciones más seguras con los motorizados, ya que son visibles desde una distancia mayor y, por tanto, el conductor puede adaptar su comportamiento a la presencia de los mismos.

6.2.5 Gestión de la velocidad límite de la carretera

Una medida de gestión del tráfico en cuanto a carreteras convencionales con presencia de ciclistas es la gestión de la velocidad de los vehículos motorizados. Estudios anteriores han comprobado que una reducción de la velocidad de los motorizados reduce la percepción subjetiva de riesgo percibido por los ciclistas (Llorca et al., 2017; López et al., 2020). Sin embargo, la afección sobre la funcionalidad del tráfico de reducciones de la velocidad límite de los vehículos motorizados no ha sido comprobada.

En el apartado de aplicaciones del modelo de microsimulación se han analizado tres escenarios según la velocidad límite de los vehículos motorizados:

1. En un primer escenario se ha simulado la situación normal en la que los vehículos motorizados circulan a la velocidad límite actualmente especificada en el tramo que es de 70 km/h, pudiendo adelantar a los ciclistas a esta velocidad.
2. En el segundo escenario se ha simulado una reducción de la velocidad límite solamente durante la maniobra de adelantamiento a los ciclistas, aplicando una reducción de 20 km/h, implicando que los motorizados circulen como máximo a 70 km/h, pero deban de adelantar a los ciclistas con una velocidad máxima de 50 km/h.
3. En el tercer escenario se ha simulado una reducción de la velocidad límite de todo el tramo de carretera en 20 km/h, debiendo circular los vehículos motorizados como máximo a 50 km/h durante su recorrido del tramo de carretera.

Estos análisis de resultados se han llevado a cabo en los apartados 5.3.3 y 5.3.4. En este capítulo de discusión se comparan los resultados obtenidos en los tres escenarios relativos a la gestión de la velocidad límite del tramo de carretera.

En esta comparación de escenarios, la velocidad media de recorrido de los ligeros se ha visto más afectada cuando se ha reducido el límite de velocidad del tramo, mientras que el número de adelantamientos realizados por vehículo ha sido más elevado cuando solamente se ha

reducido la velocidad durante el adelantamiento, ya que los vehículos circulaban normalmente a velocidades mayores y por tanto han interactuado con un mayor número de ciclistas.

En cuanto a las duraciones de los adelantamientos, han sido ligeramente mayores cuando se ha reducido la velocidad solamente durante el adelantamiento, ya que los vehículos se vieron obligados a reducir su velocidad en cada adelantamiento realizado invirtiendo un cierto tiempo en decelerar en cada maniobra. Por otra parte, la reducción de la velocidad límite solamente durante la maniobra también genera más variaciones en la velocidad de los ligeros durante el recorrido del tramo, siendo estas oscilaciones molestas para los conductores a la vez que generan mayores emisiones contaminantes.

En cuanto a la exposición al riesgo global, se ha calculado ponderando la reducción en el número de adelantamientos realizados y el aumento en las duraciones de los adelantamientos obtenidas de la aplicación de las dos medidas de reducción de la velocidad, durante el adelantamiento y limitándola en todo el tramo.

Para poder comparar el efecto de estas dos medidas sobre el nivel de exposición al riesgo se ha utilizado el porcentaje de tiempo de exposición al riesgo respecto al tiempo de recorrido del tramo (%ER) (ver ecuación 13). El valor del %ER para la situación actual, donde la velocidad límite del tramo de carretera es de 70 km/h, fue del 20%. Al aplicar la primera medida de reducción de la velocidad límite durante el adelantamiento en 20 km/h el valor resultante del %ER fue del 26%, mientras que al aplicar la segunda medida de reducción de la velocidad límite durante todo el tramo en 20 km/h se obtuvo un valor del %ER del 17%.

Estos resultados indican que reducir la velocidad solamente durante la maniobra de adelantamiento a ciclistas comporta un aumento del nivel de exposición al riesgo debido al mayor porcentaje de tiempo en el que un vehículo debe circular por el carril opuesto mientras adelanta a ciclistas. Por otra parte, reducir la velocidad límite durante el recorrido del tramo implica una reducción del nivel de exposición al riesgo al reducirse el porcentaje de tiempo en el que un vehículo circula por el carril contrario respecto del tiempo total de recorrido del tramo de carretera.

6.3 Balance del contraste de hipótesis

Las principales hipótesis formuladas en esta investigación han sido contrastadas con los resultados obtenidos y con la discusión realizada a partir de investigaciones anteriores relacionadas con el ámbito de estudio, así como con normativas aplicables.

Seguidamente se resume el balance del contraste de las hipótesis formuladas en el capítulo 3:

- **H1:** La metodología de toma de datos mediante bicicletas instrumentadas permite obtener las variables necesarias para caracterizar la maniobra de adelantamiento a ciclistas. Aceptada.
- **H2:** La sección de la carretera influye en el tipo de maniobra de adelantamiento, registrándose un mayor número de maniobras lanzadas en secciones más favorables con mayores anchos de carril y arcén. En secciones desfavorables, con arcenes estrechos o nulos, el número de maniobras en seguimiento será mayor. Aceptada.
- **H3:** En secciones desfavorables la invasión del carril opuesto será mayor, ya que los conductores deben asegurarse que no hay vehículo en sentido opuesto para realizar la maniobra. Aceptada.

- **H4:** El nivel actual de cumplimiento de la normativa respecto a la separación mínima de 1.5 m requerida para adelantar a ciclistas es elevado. Aceptada.
- **H5:** En carreteras con secciones menos favorables los ciclistas circularán mayoritariamente en línea. Refutada.
- **H6:** Los adelantamientos realizados a un pelotón serán más seguros que a un ciclista aislado, presentando mayores separaciones y menores velocidades del adelantante. Refutada.
- **H7:** La duración del adelantamiento será mayor para grupos formados por más ciclistas y para la configuración en línea de los grupos. Refutada.
- **H8:** Carreteras con velocidad límite e IMD mayores presentarán duraciones del adelantamiento menores. Refutada.
- **H9:** La circulación en pelotón aumentará los adelantamientos en rectas, reduciéndolos en curvas, en comparación con un ciclista aislado. Aceptada.
- **H10:** La duración del adelantamiento en rectas será menor que en curvas. Refutada.
- **H11:** La visibilidad de los vehículos en sentido opuesto puede influir en la elección de la estrategia de adelantamiento. Cuando el vehículo opuesto sea visible el conductor realizará las maniobras con seguimiento previo. Aceptada.
- **H12:** Los pelotones de ciclistas en tramos sin pendiente, circulan como un solo vehículo, ya que los miembros del grupo circulan a la misma velocidad. Aceptada.
- **H13:** La presencia de ciclistas reduce la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados. Aceptada.
- **H14:** Las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios se verán más afectadas por la presencia de ciclistas que las relacionadas con la velocidad. Aceptada.
- **H15:** Cuando los ciclistas circulan en línea su afección sobre la funcionalidad del tráfico es mayor que cuando lo hacen en paralelo. Aceptada.

Capítulo 7

Conclusiones

En este capítulo se incluyen las principales conclusiones de la tesis, así como varias recomendaciones y propuestas de mejora enfocadas a integrar a los ciclistas de manera segura y eficaz en las carreteras convencionales. Finalmente se describen algunas líneas futuras de investigación que permitirán superar algunas de las limitaciones comentadas y ampliar las conclusiones de la presente tesis.

7.1 Conclusiones

Las principales conclusiones de la tesis se incluyen en este apartado. Se han clasificado según las diferentes partes desarrolladas en la investigación.

Conclusiones de las **metodologías de tomas de datos** empleadas:

- El uso de bicicletas instrumentadas ha permitido recoger variables suficientes para caracterizar la maniobra de adelantamiento a ciclistas en carreteras convencionales. Se han caracterizado 2,135 maniobras de adelantamiento, considerando siete configuraciones del grupo de ciclistas y cinco tramos de carretera convencional con diferentes características geométricas y de tráfico.
- Las grabaciones simultáneas en los extremos de los tramos de estudio han permitido registrar los datos necesarios para caracterizar el tráfico, tanto motorizado como ciclista, obteniendo diversas medidas de desempeño para analizar la operación del tráfico. El estudio se desarrolló en dos tramos de carretera convencional y se registraron en total 737 ciclistas y 2,023 vehículos motorizados.

Respecto a la **maniobra de adelantamiento a ciclistas**:

- El tipo de vehículo adelantante influye en las principales variables de la maniobra de adelantamiento. En esta tesis solamente se han considerado adelantamientos realizados por vehículos motorizados ligeros.
- Las manobras lanzadas (79%) han sido predominantes respecto de las realizadas desde el seguimiento del grupo de ciclistas (9%) y de las realizadas en cola de otro adelantante (12%). Se registraron más maniobras en seguimiento en carreteras estrechas y a grupos más grandes de ciclistas circulando en paralelo.
- La mayoría de los adelantamientos se realizaron sin un vehículo opuesto visible. En carreteras con sección transversal más desfavorable y en adelantamientos realizados a grupos grandes de ciclistas la presencia de un vehículo opuesto durante el adelantamiento fue menor.
- La invasión del carril opuesto fue mayor en carreteras con anchos menores, y en adelantamientos a grupos circulando en paralelo.
- Se registraron velocidades del vehículo adelantante más elevadas en carreteras con mayor límite de velocidad. Las velocidades medias de los vehículos adelantantes respetaron el límite de velocidad en todos los tramos de estudio.

- Las separaciones laterales registradas no respetaron el mínimo exigido de 1.5 m en el 27% de los casos. Este resultado presenta una mejora respecto a los datos registrados en investigaciones anteriores, demostrando una mayor concienciación de los conductores y un aumento en el cumplimiento de la normativa en los últimos años.
- La duración del adelantamiento a los ciclistas se considera un factor clave desde el punto de vista de la seguridad y de la operación del tráfico en carreteras convencionales. Duraciones elevadas representan un mayor tiempo en el carril opuesto, donde el riesgo de colisión frontal con los opuestos es mayor, mientras que duraciones muy cortas pueden suponer un peligro desde el punto de vista de los ciclistas. Por otra parte, la duración del adelantamiento condiciona el número de adelantamientos realizados, sobre todo en situaciones de tráfico elevado o de reducida visibilidad. Por tanto, es necesario analizar la duración del adelantamiento en mayor profundidad.

Sobre el modelo de **duración del adelantamiento a ciclistas**:

- Las maniobras lanzadas presentaron en promedio una menor duración del adelantamiento, una mayor velocidad del adelantante y una menor separación lateral que las realizadas desde el seguimiento a los ciclistas. Debido a estas diferencias se desarrollaron y validaron dos modelos de la duración del adelantamiento, uno para cada tipo de maniobra.
- Las maniobras lanzadas implicaron un menor porcentaje de invasión del carril contrario (77%) frente a las maniobras en seguimiento (93%); este hecho, además de la menor duración de los adelantamientos, demuestra que estas maniobras eran las preferidas por los conductores.
- Los modelos Bayesianos desarrollados presentaron un buen ajuste tanto para las maniobras lanzadas como para las de seguimiento. Los modelos seleccionados fueron los que consideraron la distribución log-normal y todos los factores analizados relativos a la carretera, al grupo de ciclistas y a la propia maniobra.
- El ancho del carril y del arcén debe de considerarse conjuntamente, ya que es el espacio total donde interactúan los vehículos motorizados y las bicicletas. Carreteras convencionales más anchas presentaron menores duraciones de adelantamiento. Arcenes más anchos ofrecen una mayor separación lateral y una menor duración de adelantamiento, por lo que pueden considerarse una contramedida segura desde el punto de vista del ciclista y del conductor.
- La duración del adelantamiento fue mayor para grupos formados por un número mayor de ciclistas en ambas estrategias de adelantamiento. El número de ciclistas en el grupo también influye en la elección de la estrategia, de manera que, con más ciclistas en el grupo, se observaron más maniobras en seguimiento.
- Grupos en paralelo presentaron mayores duraciones que en línea en las maniobras lanzadas, debido al mayor desplazamiento del conductor durante la maniobra, mientras que para las maniobras en seguimiento los grupos en paralelo generaron duraciones menores.
- Se registraron duraciones más cortas del adelantamiento cuando un vehículo opuesto estaba presente para ambas estrategias. Sin embargo, el 80% de las maniobras en seguimiento se realizaron sin un vehículo opuesto presente, frente al 69% de las

maniobras lanzadas, lo que demuestra que la presencia de un vehículo opuesto induce a más conductores a elegir la maniobra en seguimiento.

- Se observaron mayores duraciones del adelantamiento con menores velocidades del vehículo adelantante, y con mayores separaciones laterales. Sin embargo, para las maniobras lanzadas, se obtuvo un valor medio más alto y un intervalo de credibilidad más estrecho del parámetro de separación lateral, lo que indica un fuerte efecto de la separación lateral sobre la duración del adelantamiento para este tipo de maniobras.
- Los modelos de duración del adelantamiento desarrollados en esta investigación pueden ser utilizados para obtener valores predictivos considerando otras configuraciones de agrupación de ciclistas u otras características de la carretera. Estas predicciones se pueden utilizar como entrada a los modelos de microsimulación de tráfico, para calibrar las longitudes efectivas de otros grupos de ciclistas diferentes a los observados, aumentando la validez de los estudios de microsimulación.

Análisis de la **funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas:**

- A partir de las **observaciones naturalísticas en los extremos de los tramos de estudio** se obtuvieron las siguientes conclusiones:
 - A partir de las tomas de datos en inicio y fin de tramo se obtuvieron las velocidades medias de recorrido de cada vehículo motorizado y de cada bicicleta, observando una disminución de la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados a medida que adelantan a más ciclistas. Cuando se adelanta a grupos de ciclistas la disminución en la velocidad media de recorrido de los ligeros fue más acusada.
 - El número de medidas de desempeño obtenidas mediante esta metodología es limitado, siendo necesario el uso de otras herramientas para obtener medidas de desempeño a nivel microscópico de los usuarios.
 - Las tomas de datos en campo ofrecen pocas posibilidades a la hora de analizar la funcionalidad, ya que los escenarios de tráfico observados difícilmente adoptan valores extremos, y, por tanto, el rango de escenarios de tráfico observado no es muy elevado.
 - Estas observaciones son necesarias para entender el comportamiento de los diferentes usuarios en el tramo, y para recoger datos que permitan calibrar y validar otras herramientas que permitan aumentar tanto el rango de escenarios de tráfico observados como las medidas de desempeño obtenidas.
- Sobre el modelo de **microsimulación del tráfico:**
 - El módulo existente en Aimsun Next para simular adelantamientos en carreteras convencionales ha sido adaptado de manera que considere el comportamiento de los ciclistas, de los vehículos motorizados y su interacción. Una de las claves de esta adaptación es la calibración de las longitudes equivalentes de cada grupo de ciclistas de manera que se consigan duraciones de los adelantamientos similares a las observadas en campo, representando así la invasión parcial del carril opuesto durante los adelantamientos. Los grupos de ciclistas se consideran un solo usuario en tramos sin pendiente, ya que sus integrantes circulan a la misma velocidad y manteniendo la configuración, como se ha observado en campo. Otras adaptaciones del modelo han consistido en discretizar a los ciclistas, permitiendo su

adelantamiento incluso en línea continua, y en solo dos pasos de simulación para conseguir adelantamientos con menores duraciones.

- Los procesos de calibración y validación del microsimulador de tráfico son esenciales para asegurar que el modelo representa la realidad correctamente. El modelo ha sido calibrado a nivel microscópico, con datos de adelantamientos realizados a los diferentes grupos de ciclistas, y a nivel macroscópico, con datos de velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados, intervalos de tiempo entre vehículos y porcentajes de vehículos en cola en los extremos del tramo.
- El uso de modelos de microsimulación del tráfico, debidamente adaptados, calibrados y validados, permite estudiar el efecto que tiene la presencia de ciclistas sobre determinadas medidas de desempeño que caracterizan la seguridad y la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales, siendo algunas de estas medidas difíciles de obtener en campo.
- La metodología desarrollada en el presente proyecto de investigación, para adaptar, calibrar y validar un modelo que permita recrear en microsimulación la interacción de conductores y ciclistas, puede ser extrapolada para el estudio de otras carreteras con diferentes características geométricas y de tráfico, siempre y cuando sean tomados datos de campo particulares en las carreteras que se pretendan analizar.
- Mediante la **simulación de escenarios de tráfico observados** se han alcanzado las siguientes conclusiones:
 - Se confirma la afcción sobre la velocidad media de recorrido de los vehículos ligeros, decreciendo esta velocidad a medida que aumenta la demanda ciclista.
 - El número de adelantamientos realizados por vehículo ligero también se vio incrementado a medida que aumentó la demanda ciclista.
 - El tiempo de demora de los vehículos ligeros durante su recorrido del tramo aumentó al simular escenarios con demandas ciclistas mayores.
 - El porcentaje de vehículos en cola a la entrada y salida de los tramos de estudio presentó unos valores más elevados para los escenarios con mayores demandas ciclistas.
- A partir del **uso del modelo de microsimulación para simular escenarios de tráfico diseñados** se han caracterizado diferentes **medidas de desempeño**, obteniendo las siguientes conclusiones:
 - Para todas las medidas de desempeño analizadas la presencia de tráfico ciclista afecta a su resultado de tal manera que, al aumentar el tráfico ciclista, los valores de estas medidas representan un empeoramiento de la funcionalidad del tráfico.
 - El aumento de la demanda ciclista en la carretera se traduce en una reducción de la velocidad media de recorrido de los vehículos motorizados, en un aumento del tiempo de demora de los motorizados y en un aumento del porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo de estudio. El número de adelantamientos realizados por vehículo se incrementa al incorporar bicicletas en el tramo, llegando a un máximo para un cierto nivel de demanda ciclista a partir del cual decrece. La densidad de seguidores a la salida del tramo también ha sido caracterizada en este

estudio, observándose un aumento de esta medida de desempeño a medida que aumenta la demanda ciclista en el tramo de carretera.

- La presencia de ciclistas afecta a la funcionalidad del tráfico principalmente por la diferencia de velocidades entre estos usuarios y los vehículos motorizados, aumentando la necesidad de realizar adelantamientos y generando demoras en los vehículos ligeros debidas al seguimiento previo al adelantamiento.
- Los resultados obtenidos en los dos tramos de estudio en cuanto al análisis de sensibilidad de las medidas de desempeño respecto a variaciones en la demanda ciclista son similares. La medida de desempeño que ha presentado una mayor sensibilidad a la incorporación de ciclistas en el tramo ha sido el número de adelantamientos realizados por vehículo, seguida por las medidas relacionadas con la demora de los ligeros, presentando una tasa de variación ligeramente superior la demora que el porcentaje de demora respecto del tiempo de viaje. Las medidas de desempeño relacionadas con el seguimiento entre usuarios han presentado unas tasas de variación menores que las medidas anteriores, presentando una mayor sensibilidad la densidad de seguidores que el porcentaje de vehículos en cola a la salida del tramo. La velocidad media de recorrido de los ligeros ha sido la menos sensible a la incorporación de ciclistas en el tramo para todos los casos analizados.
- Al aumentar el nivel de tráfico motorizado en estos dos tramos, las medidas de desempeño analizadas presentan variaciones menores debidas a la presencia de ciclistas en el tramo. Esto se debe a que el propio tráfico motorizado ya supone unos valores elevados de estas medidas de desempeño. Sin embargo, la afección de los ciclistas sigue la misma línea que en los escenarios con menor tráfico motorizado.
- En cuanto a las diferencias observadas entre los dos tramos de carretera, los valores no son comparables entre sí, ya que cada tramo tiene unas características geométricas y de tráfico diferentes. Sin embargo, se observa que, en el tramo de carretera estrecha, correspondiente a la CV-502, para tráfico motorizado medio, las diferencias entre las tasas de variación del número de adelantamientos y las medidas relacionadas con la demora son menores que las registradas en la carretera más ancha, correspondiente a la CV-310. Esto se traduce en que en carreteras estrechas el número de adelantamientos es menos elevado que en carreteras más anchas, generando más demora en los vehículos ligeros.
- Las diferencias entre las configuraciones en línea o en paralelo en las que circulan los grupos de ciclistas son en general no significativas, solamente para el número de adelantamientos realizados por vehículo esta diferencia es significativa en los escenarios de tráfico motorizado menos cargados para carreteras estrechas, obteniéndose más adelantamientos cuando los grupos circulan en paralelo debido a su menor longitud. Este resultado indica que, en carreteras estrechas, la circulación de los grupos en paralelo facilita que se produzcan adelantamientos, mejorando así la funcionalidad del tráfico en estas condiciones, y, por tanto, esto sugiere la circulación de grupos de ciclistas en paralelo en carreteras estrechas.
- Para el mismo número de ciclistas, su reparto en grupos de mayor tamaño ha presentado una menor afección sobre la funcionalidad del tráfico, reduciendo el número de maniobras de adelantamiento necesarias, y mejorando en general el resto de medidas de desempeño. Por tanto, en general, se prefieren tamaños de grupos de ciclistas mayores frente a los mismos ciclistas circulando individualmente,

ya que suponen un menor número de interacciones, y por tanto afectan en menor medida a la funcionalidad del tráfico. Sin embargo, cuando las demandas ciclistas y las motorizadas son más elevadas, la circulación de grupos de tamaño medio es más aconsejable, ya que suponen un término medio entre el número de grupos y la duración requerida para adelantarles.

- Una reducción en la velocidad de los ligeros solamente durante el adelantamiento supone un empeoramiento evidente de la seguridad y la funcionalidad del tráfico en la carretera. La aplicación de esta reducción en la velocidad ha generado una reducción en la velocidad media de recorrido del tramo, un aumento en el tiempo de demora y una reducción en el número de adelantamientos realizados por vehículo. Esta medida también ha generado un aumento en las duraciones de los adelantamientos a los diferentes grupos de ciclistas, 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 opuestos. El porcentaje de tiempo en el que un vehículo debe de circular por el carril opuesto respecto del tiempo total de recorrido del tramo se ve aumentado en un 6% al reducir la velocidad durante el adelantamiento en 20 km/h. Por otra parte, la reducción de la velocidad límite solamente durante la maniobra también genera más variaciones en la velocidad de los ligeros durante el recorrido del tramo, siendo estas oscilaciones molestas para los conductores.
- La reducción de la velocidad límite de la carretera penaliza la funcionalidad del tráfico ya que se reduce la velocidad media de recorrido de los ligeros, aumentando la duración de los adelantamientos. Sin embargo, el número de adelantamientos realizados por vehículo se ve reducido, al interactuar cada vehículo con menos ciclistas. Esta medida está enfocada a aumentar la seguridad de los ciclistas, ya que los adelantamientos se realizarán a velocidades menores. La reducción del límite de velocidad supone duraciones mayores del adelantamiento, aumentando la exposición al riesgo de colisión frontal con los opuestos durante la invasión del carril contrario, sin embargo, esta medida también supone una reducción del número de adelantamiento realizados, reduciendo por esta parte la exposición al riesgo, generando una mejora global de la exposición al riesgo según el porcentaje de tiempo de exposición al riesgo respecto del tiempo de recorrido del tramo.

Esta investigación ha permitido realizar un completo estudio de la maniobra de adelantamiento a ciclistas en carreteras convencionales, analizando en profundidad la duración del adelantamiento, ya que se ha constatado que es una variable con especial importancia en cuanto a la seguridad y a la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales con presencia de ciclistas. Adicionalmente se ha realizado un estudio de diversas medidas de desempeño que permiten caracterizar la afección sobre la operación del tráfico causada por la circulación de ciclistas. Este análisis se ha llevado a cabo mediante el uso de un modelo de microsimulación del tráfico, debidamente adaptado a la circulación de ciclistas en grupo, así como a su interacción con los vehículos motorizados, y que ha sido calibrado y validado a partir de datos observados.

Las conclusiones descritas se limitan al alcance de la tesis definido en el capítulo 3, siendo válidas para carreteras convencionales en terreno llano y para los niveles de tráfico analizados en esta investigación.

7.2 Recomendaciones y propuestas de mejora

A partir de los resultados y de las conclusiones obtenidas en esta investigación se han formulado una serie de recomendaciones y propuestas de mejora enfocadas a integrar a los ciclistas en las carreteras convencionales de una manera segura y eficaz.

Estas recomendaciones y propuestas de mejora son:

- Identificación de tramos peligrosos tanto para ciclistas como para conductores, y señalización de los tramos con elevada presencia ciclista con el fin de que los conductores adapten su comportamiento a la presencia de ciclistas y realicen interacciones más seguras. La señalización activa de tramos de carretera con presencia de tráfico ciclista ha evolucionado considerablemente en los últimos años, permitiendo informar a los conductores de la presencia de ciclistas en el tramo de carretera en tiempo real, y adoptar medidas adaptadas según el nivel de demanda ciclista registrado en cada momento.
- Ampliación de la sección transversal. Se ha comprobado que carreteras más anchas ofrecen mayores separaciones y menores duraciones del adelantamiento a ciclistas, por tanto, son más seguras para los ciclistas y para los conductores. Arcenes más anchos suponen mayores separaciones laterales y menores duraciones del adelantamiento, mejorando la seguridad y la operación del tráfico al facilitar los adelantamientos a los ciclistas. Esta ampliación de la sección se centra en los arcenes, generando un mayor espacio para la circulación de ciclistas. Al mismo tiempo se pueden reducir las dimensiones de los carriles, obligando a los conductores a reducir su velocidad.
- Construcción de apartaderos para ciclistas. Para mejorar la funcionalidad del tráfico en carretera convencionales con presencia de ciclistas es esencial facilitar la maniobra de adelantamiento a los ciclistas. En carreteras estrechas en las que no sea posible ampliar la sección en toda la longitud del tramo se recomienda la construcción de apartaderos puntuales en los que los ciclistas puedan incorporarse permitiendo que los vehículos motorizados les adelanten sin interactuar con ellos ni invadir el carril opuesto. Estos apartaderos deberán de proyectarse en zonas donde se produzcan colas y en tramos con tráfico ciclista elevados que justifiquen su construcción, considerando las duraciones de adelantamiento resultantes de esta investigación como principal factor para el diseño de su longitud.
- Circulación de grupos en paralelo en carreteras estrechas. Se ha comprobado que requieren una menor duración del adelantamiento, facilitando la maniobra y mejorando así la funcionalidad del tráfico.
- Campañas de concienciación y educación. Con la finalidad de integrar a los ciclistas y normalizar su circulación por carreteras convencionales se propone realizar campañas de concienciación y educación de la ciudadanía en general, promoviendo el conocimiento de la normativa, asegurando así un mayor cumplimiento de la separación mínima requerida durante el adelantamiento y un mayor respeto a los ciclistas en carretera. También los ciclistas deben de conocer sus obligaciones en cuanto a la circulación por carretera.
- Reducción de velocidades límite en tramos de carretera y horarios con máxima afluencia ciclista. Menores velocidades límite aumentan la seguridad de los ciclistas al realizar adelantamientos con velocidades menores. La reducción del límite de velocidad supone

un aumento de las duraciones del adelantamiento, sin embargo, también reduce el número de interacciones con los ciclistas, compensando la exposición al riesgo de los conductores. Sin embargo, la reducción de la velocidad solamente durante el adelantamiento supone un empeoramiento de la funcionalidad del tráfico generando variaciones de velocidad que pueden resultar incómodas y peligrosas, además es una medida con un difícil control del cumplimiento.

- Considerar la presencia de ciclistas en el diseño de futuras carreteras. A partir de estudios de estimación de la demanda ciclista se deberían construir infraestructuras viarias en las que se disponga de un espacio específico para ciclistas.
- Mantenimiento y limpieza frecuentes de arcenes para permitir una circulación segura de los ciclistas evitando que deban abandonar el arcén por existencia de vegetación o mal estado del pavimento.
- A la vista de los resultados obtenidos en el tramo de carretera con arcenes coloreados no se recomienda ejecutar esta medida, ya que se han observado valores de separaciones laterales menores, velocidades durante el adelantamiento mayores y duraciones del adelantamiento menores a las esperadas según las características geométricas y de tráfico del tramo de carretera.

7.3 Futuras líneas de investigación

Mediante el desarrollo de esta tesis se ha ampliado el conocimiento respecto a las interacciones entre conductores y ciclistas en carreteras convencionales, analizando el efecto que suponen los ciclistas sobre la funcionalidad del tráfico en este tipo de vías.

Sin embargo, a partir de los resultados y de las conclusiones obtenidas en esta tesis, y debido sobre todo al alcance de la misma, se han identificado una serie de limitaciones que han permitido plantear posibles líneas de investigación con el fin de ampliar el conocimiento en este ámbito. En este apartado se describen las líneas de investigación propuestas a partir de las limitaciones y carencias observadas en la presente investigación.

Las líneas de investigación propuestas se centran en ampliar el estudio a otras tipologías de tramos de carretera, así como a otros tipos de vehículos adelantantes. También están dirigidas a ampliar el uso del modelo de microsimulación del tráfico, permitiendo analizar diferentes escenarios variando tanto las características geométricas como de tráfico. Finalmente, se propone investigar la percepción de riesgo de los ciclistas y su relación con las variables relativas a la carretera, a los ciclistas y a la propia maniobra de adelantamiento.

A continuación, se proponen algunas líneas de investigación:

1. Ampliación de la investigación a carreteras convencionales con pendiente. En este tipo de carreteras la velocidad de los ciclistas está influenciada por la pendiente, y la diferencia de velocidades entre conductores y ciclistas es elevada, sobre todo en tramos de subida. En estas condiciones la afcción sobre la funcionalidad del tráfico puede ser diferente que la obtenida en la presente tesis, debiendo de analizarse a partir de observaciones. La metodología desarrollada en esta tesis sería aplicable a tramos con pendiente, debiendo de tomarse datos de campo a nivel microscópico y a nivel macroscópico, para seguidamente modelar el fenómeno en el microsimulador de tráfico.

2. Ampliación de la investigación a adelantamientos realizados por otros tipos de vehículos, principalmente vehículos pesados y motocicletas. En la presente investigación se ha comprobado que estos tipos de vehículos motorizados presentaron un comportamiento diferente durante el adelantamiento a ciclistas, siendo necesario investigar con profundidad estas diferencias, enfocándolas en las fuerzas aerodinámicas que ejercen sobre los ciclistas cada tipo de vehículo adelantante. A partir de los resultados obtenidos para cada tipo de vehículo adelantante, se puede analizar el efecto de variar el porcentaje de vehículos pesados y de motocicletas existente en cada carretera, ya que puede influir también en la funcionalidad del tráfico.
3. Modelización de más tramos de estudio en el microsimulador de tráfico, con el fin de ampliar las conclusiones a más tipologías de carreteras convencionales, comprobando si la afección sobre la funcionalidad es similar en otros tramos de carretera. Para ello es necesario tomar más datos con las bicicletas instrumentadas y en los extremos de los tramos de carretera con el fin de obtener los datos de tráfico necesarios para calibrar y validar el modelo de microsimulación. En la presente investigación se han desarrollado los modelos de microsimulación en dos tramos de carretera convencional con diferentes características tanto geométricas como de tráfico, sin embargo, ampliar el estudio a otros tramos de carretera permitiría ampliar el alcance del estudio y de las conclusiones. El estudio sería ampliable en primer lugar a los otros tres tramos en los que se han recogido datos con las bicicletas instrumentadas, debiendo de obtener solamente datos a nivel macroscópico en los extremos del tramo.
4. Explotación del modelo de microsimulación del tráfico adaptado, calibrado y validado en esta investigación, para simular escenarios con variaciones de la geometría de la carretera. Se propone analizar el efecto de la incorporación de apartaderos con el fin de facilitar el adelantamiento a ciclistas. Se estudiará el efecto de estos apartaderos según la localización en la que se dispongan, así como su efectividad según el nivel de tráfico ciclista y motorizado de la carretera. De esta manera se determinará a partir de que nivel de tráfico las mejoras aportadas por los apartaderos justifican su construcción, y en que localizaciones su efectividad es mayor, así como las longitudes óptimas de los mismos.
5. Explotación del modelo de microsimulación del tráfico adaptado, calibrado y validado en esta investigación, para simular escenarios con variaciones en el tamaño de los grupos de ciclistas considerando grupos mucho más grandes. La duración del adelantamiento a grupos con un número de ciclistas diferente a los observados se obtendrá a partir del modelo de duración del adelantamiento desarrollado en esta tesis. Este modelo permite realizar predicciones de duraciones variando las características de la carretera, del grupo de ciclistas y de la propia maniobra. De esta manera se puede analizar el efecto de grandes grupos de ciclistas sobre la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales.
6. Mejora de los modelos para cada una de las medidas de desempeño analizadas en esta investigación según la demanda ciclista, de manera que representen correctamente el fenómeno. En la tesis se han obtenido modelos de regresión básicos, sin entrar en el

análisis de estos modelos más en profundidad. En este sentido se debería de ampliar la investigación en el desarrollo de estos modelos, de manera que se analice la sensibilidad de cada una de las medidas de desempeño estudiadas a variaciones de la demanda ciclista, especialmente en el intervalo de demanda ciclista en el que la variación de cada medida de desempeño es máxima.

7. Análisis de la relación entre la percepción subjetiva del riesgo de los ciclistas y las variables analizadas en este estudio, especialmente la separación lateral, la velocidad del adelantante y la duración del adelantamiento. Durante el proceso de toma de datos con las bicicletas instrumentadas se utilizó también un dispositivo situado en el manillar de las bicicletas con cinco botones, variando desde el color verde hasta el negro, mediante los cuales cada uno de los ciclistas marcó el nivel de riesgo percibido en cada una de las maniobras de adelantamiento registradas. Estos datos deben ser explotados, relacionando el nivel de riesgo percibido de los ciclistas con el resto de variables obtenidas para cada maniobra de adelantamiento, obteniendo un modelo predictivo de la percepción del riesgo de los ciclistas que permita incorporar mejoras en la gestión de la carretera para reducir esta percepción del riesgo.
8. Comparación de los datos observados y de los obtenidos en el microsimulador de tráfico con datos proporcionados en un simulador de conducción. Esta línea de investigación ya ha sido iniciada, representando un tramo de carretera real en el simulador de conducción de la Universitat Politècnica de València. El uso del simulador de conducción permite obtener datos desde el punto de vista de los conductores de una manera rápida. A pesar de que el simulador de conducción se ha utilizado en diversas investigaciones anteriores relativas a las interacciones entre conductores y ciclistas en carreteras convencionales, en ninguna de estas investigaciones se han comparado la validez de los datos obtenidos en el simulador de tráfico con los obtenidos mediante otras metodologías.

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral 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 la doctoranda es beneficiaria.

La autora quiere agradecer la colaboración en el desarrollo de la tesis, especialmente durante las tomas de datos y en su posterior reducción, de los investigadores del Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras de la Universitat Politècnica de València.

Se agradece a la Chalmers University of Technology de Göteborg (Sweden) su colaboración en la realización de la estancia de investigación, en especial al Profesor Dr. Marco Dozza, quien supervisó el trabajo realizado durante la estancia.

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

Finalmente, la autora quiere agradecer a Aimsun SLU su colaboración en el desarrollo del estudio de microsimulación de tráfico.

Referencias bibliográficas

- Aimsun, 2021. Aimsun Next [WWW Document]. <https://www.aimsun.com/es/aimsun-next/>. URL <https://www.aimsun.com/es/aimsun-next/>
- Al-Kaisy, A., Jafari, A., Washburn, S., Lutinnen, T., Dowling, R., 2018. Traffic operations on rural two-lane highways: A review on performance measures and indicators. *Transp. Res. Rec.* 2672 15, 66–74. doi:10.1177/0361198118774743
- Aldred, R., Jones, P., Best, L., 2019. Cyclists in shared bus lanes: Could there be unrecognised impacts on bus journey times? *Proc. Inst. Civ. Eng. Transp.* 172 3 . doi:10.1680/jtran.16.00072
- AlRajie, H., Ismail, K., 2016. Investigation of Using Microscopic Traffic Simulation Tools to Predict Cyclist-Vehicle-Traffic Conflicts at Signalized Intersections. *Transp. Res. Board 95th Annu. Meet.* 16.
- Appiah, J., King, F.A., Fontaine, M.D., Cottrell, B.H., 2020. Left turn crash risk analysis: Development of a microsimulation modeling approach. *Accid. Anal. Prev.* 144 May , 105591. doi:10.1016/j.aap.2020.105591
- Asaithambi, G., Shrivani, G., 2017. Overtaking behaviour of vehicles on undivided roads in non-lane based mixed traffic conditions. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.* 4 3 . doi:10.1016/j.jtte.2017.05.004
- Bahmankhah, B., Fernandes, P., Coelho, M.C., 2019. Cycling at intersections: A multi-objective assessment for traffic, emissions and safety. *Transport* 34 2 . doi:10.3846/transport.2019.8946
- Barceló, J., 2010. *Fundamentals of Traffic Simulation*, International Series in Operations Research & Management Science. doi:10.1007/978-1-4419-6142-6
- Beck, B., Chong, D., Olivier, J., Perkins, M., Tsay, A., Rushford, A., Li, L., Cameron, P., Fry, R., Johnson, M., 2019. How much space do drivers provide when passing cyclists? Understanding the impact of motor vehicle and infrastructure characteristics on passing distance. *Accid. Anal. Prev.* 128, 253–260. doi:10.1016/j.aap.2019.03.007
- Beck, B., Perkins, M., Olivier, J., Chong, D., Johnson, M., 2021. Subjective experiences of bicyclists being passed by motor vehicles: The relationship to motor vehicle passing distance. *Accid. Anal. Prev.* 155. doi:10.1016/j.aap.2021.106102
- Bella, F., Gulisano, F., 2020. A hazard-based model of the motorcyclists' overtaking duration. *Accid. Anal. Prev.* 141. doi:10.1016/j.aap.2020.105522
- Bella, F., Silvestri, M., 2017. Interaction driver–bicyclist on rural roads: Effects of cross-sections and road geometric elements. *Accid. Anal. Prev.* doi:10.1016/J.AAP.2017.03.008
- Bianchi Piccinini, G.F., Moretto, C., Zhou, H., Itoh, M., 2018. Influence of oncoming traffic on drivers' overtaking of cyclists. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 59, 378–388. doi:10.1016/j.trf.2018.09.009
- Bürkner, P.-C., Vuorre, M., 2019. Ordinal Regression Models in Psychology: A Tutorial. *Adv. Methods Pract. Psychol. Sci.* 2 1 . doi:10.1177/2515245918823199
- Bürkner, P.C., 2019. Bayesian item response modelling in R with brms and stan. *arXiv*.
- Bürkner, P.C., 2018. Advanced Bayesian multilevel modeling with the R package brms. *R J.* 10 1

- . doi:10.32614/rj-2018-017
- Bürkner, P.C., 2017. brms: An R package for Bayesian multilevel models using Stan. *J. Stat. Softw.* 80. doi:10.18637/jss.v080.i01
- Camacho-Torregrosa, F.J., Llopis-Castelló, D., López-Maldonado, G., García, A., 2021. An examination of the strava usage rate—a parameter to estimate average annual daily bicycle volumes on rural roadways. *Safety* 7 1 . doi:10.3390/safety7010008
- Chapman, J., Noyce, D., 2012. Observations of driver behavior during overtaking of bicycles on rural roads. *Transp. Res. Rec.* 2321 . doi:10.3141/2321-06
- Chapman, J.R., Noyce, D.A., 2014. Influence of roadway geometric elements on driver behavior when overtaking bicycles on rural roads. *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)* 1 1 , 28–38. doi:10.1016/S2095-7564(15)30086-6
- Chapman R, J., 2016. Evaluation of Lateral Clearance Distances Between Vehicles and Bicycles During Overtaking Maneuvers on Rural Roads. *Trb* 19p.
- Chuang, K.H., Hsu, C.C., Lai, C.H., Doong, J.L., Jeng, M.C., 2013. The use of a quasi-naturalistic riding method to investigate bicyclists' behaviors when motorists pass. *Accid. Anal. Prev.* doi:10.1016/j.aap.2013.03.029
- Comisión Europea, 2019. DIRECTIVA (UE) 2019/1936 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO.
- Córdoba Baviera, R., 2019. Análisis de la demanda ciclista y propuesta de una metodología para su caracterización en carreteras convencionales. Desarrollo de un mapa de tráfico de ciclistas en el entorno de las carreteras CV-333, CV-25, CV-331 y CV-305 (provincia de Valencia).
- Debnath, A.K., Haworth, N., Schramm, A., Heesch, K.C., Somoray, K., 2018. Factors influencing noncompliance with bicycle passing distance laws. *Accid. Anal. Prev.* 115. doi:10.1016/j.aap.2018.03.016
- Diputació de València, 2019. Libro de aforos 2019.
- Diputació de València, 2015. Caracterización de la Accidentalidad ciclista en la Red de Carreteras de la Diputación de Valencia (2009-2014).
- Dirección General de Tráfico, 2019a. Las principales cifras de la siniestralidad vial 2019 1–226.
- Dirección General de Tráfico, 2019b. Estrategia Estatal por la Bicicleta. Documento ejecutivo 26.
- Dozza, M., Schindler, R., Bianchi-Piccinini, G., Karlsson, J., 2016. How do drivers overtake cyclists? *Accid. Anal. Prev.* 88. doi:10.1016/j.aap.2015.12.008
- Dozza, M., Werneke, J., 2014. Introducing naturalistic cycling data: What factors influence bicyclists' safety in the real world? *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 24. doi:10.1016/j.trf.2014.04.001
- Dumoncaux, R., Antle, C.E., 1973. Discrimination between the log-normal and the weibull distributions. *Technometrics* 15 4 . doi:10.1080/00401706.1973.10489124
- European Transport Safety Council, 2020. How safe is walking and cycling in Europe? PIN Flash Report 38. January , 73.
- Farah, H., Bianchi Piccinini, G., Itoh, M., Dozza, M., 2019. Modelling overtaking strategy and lateral distance in car-to-cyclist overtaking on rural roads: A driving simulator experiment.

- Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav. 63. doi:10.1016/j.trf.2019.04.026
- Feizi, A., Mastali, M., Van Houten, R., Kwigizile, V., Oh, J.S., 2021. Effects of bicycle passing distance law on drivers' behavior. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 145. doi:10.1016/j.tra.2020.12.017
- Feng, F., Bao, S., Hampshire, R.C., Delp, M., 2018. Drivers overtaking bicyclists—An examination using naturalistic driving data. *Accid. Anal. Prev.* doi:10.1016/j.aap.2018.03.010
- Fraser, M.L., Meuleners, L.B., 2020a. Risk factors for unsafe events involving a motor vehicle for group riders (cyclists): A naturalistic case-crossover study. *Accid. Anal. Prev.* 146. doi:10.1016/j.aap.2020.105758
- Fraser, M.L., Meuleners, L.B., 2020b. Characteristics of unsafe events involving a motor vehicle for group riders in Western Australia: A naturalistic study. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 74. doi:10.1016/j.trf.2020.08.004
- García, A., Domènech, A.Á., Llorca, C., Gómez, F.A., Ferrer, V., 2015. Effects of Road Geometry on the Interaction between Cyclists and Vehicles on Two-lane Rural roads, in: 5th International Symposium on Highway Geometric Design.
- García, A., Llorca, C., Serra-Planelles, J., 2020. Influence of peloton configuration on the interaction between sport cyclists and motor vehicles on two-lane rural roads. *J. Transp. Saf. Secur.* 12 1 , 136–150. doi:10.1080/19439962.2019.1591557
- García, A., Lowry, M.B., López, G., Camacho-Torregrosa, F.J., 2017. Estimating cyclist volumes on two-lane rural roads using Strava data, in: 6th International Conference on Road Safety and Simulation. pp. 1–10.
- Gelman, A., Goodrich, B., Gabry, J., Vehtari, A., 2019. R-squared for Bayesian Regression Models. *Am. Stat.* doi:10.1080/00031305.2018.1549100
- Gelman, A., Vehtari, A., Simpson, D., Margossian, C.C., Carpenter, B., Yao, Y., Kennedy, L., Gabry, J., Bürkner, P.-C., Modrák, M., 2020. Bayesian Workflow.
- Generalitat Valenciana, 2020a. Mapa d'accidents de bicicletes de la Generalitat Valenciana (2012-2016) [WWW Document]. URL https://politicaterritorial.gva.es/va/web/carreteras/seguridad-vial-car/-/documentos/GrKHCDUYqhQ0/folder/164498941;jsessionid=B96ED08804074AFBD7A79CE86AB750F7?p_auth=OVk2Oh4d
- Generalitat Valenciana, 2020b. INTENSIDAD MEDIA DIARIA / INTENSITAT MITJANA DIÀRIA IMD 2016-2020 INTENSIDAD MEDIA DIARIA / INTENSITAT MITJANA DIÀRIA IMD 2016-2020.
- Generalitat Valenciana, 2017. Libro blanco sobre la protección de las personas usuarias de la bicicleta en la Comunitat Valenciana Plan de choque para la.
- Goddard, T., McDonald, A., Alambeigi, H., Kim, A., Anderson, B., 2020. Unsafe bicyclist overtaking behavior in a simulated driving task: The role of implicit and explicit attitudes. *Accid. Anal. Prev.* 144. doi:10.1016/j.aap.2020.105595
- Grigoropoulos, G., Hosseini, S.A., Keler, A., Kathis, H., Spangler, M., Busch, F., Bogenberger, K., 2021. Traffic simulation analysis of bicycle highways in urban areas. *Sustain.* 13 3 . doi:10.3390/su13031016
- Haworth, N., Heesch, K.C., Schramm, A., 2018a. Drivers who don't comply with a minimum passing distance rule when passing bicycle riders. *J. Safety Res.* 67. doi:10.1016/j.jsr.2018.10.008

- Haworth, N., Heesch, K.C., Schramm, A., Debnath, A.K., 2018b. Do Australian drivers give female cyclists more room when passing? *J. Transp. Heal.* 9. doi:10.1016/j.jth.2018.03.003
- Haworth, N., Schramm, A., Schramm, N., 2014. The safety of bicycles being overtaken by cars: What do we know and what do we need to know? *Proc. 2014 Australas. Road Saf. Res. Polic. Educ. Conf.*
- Heesch, K.C., Schramm, A., Debnath, A.K., Haworth, N., 2017. Cyclists' perceptions of motorist harassment pre- to post-trial of the minimum passing distance road rule amendment in Queensland, Australia. *Heal. Promot. J. Aust.* doi:10.1071/HE16119
- Hunter, W.W., Feaganes, J.R., Srinivasan, R., 2005. Conversions of wide curb lanes: The effect on bicycle and motor vehicle interactions, in: *Transportation Research Record.* doi:10.3141/1939-05
- Johnson, M., Oxley, J., Newstead, S., Charlton, J., 2014. Safety in numbers? Investigating Australian driver behaviour, knowledge and attitudes towards cyclists. *Accid. Anal. Prev.* doi:10.1016/j.aap.2014.02.010
- Kazemzadeh, K., Laureshyn, A., Hiselius, L.W., Ronchi, E., 2020. Expanding the scope of the bicycle level-of-service concept: A review of the literature. *Sustain.* doi:10.3390/su12072944
- Kovaceva, J., Bärghman, J., Dozza, M., 2020. A comparison of computational driver models using naturalistic and test-track data from cyclist-overtaking manoeuvres. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 75. doi:10.1016/j.trf.2020.09.020
- Kovaceva, J., Nero, G., Bärghman, J., Dozza, M., 2019. Drivers overtaking cyclists in the real-world: Evidence from a naturalistic driving study. *Saf. Sci.* 119. doi:10.1016/j.ssci.2018.08.022
- Llorca, C., Angel-Domenech, A., Agustin-Gomez, F., Garcia, A., 2017. Motor vehicles overtaking cyclists on two-lane rural roads: Analysis on speed and lateral clearance. *Saf. Sci.* doi:10.1016/j.ssci.2015.11.005
- 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. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 52, 157–172. doi:10.1016/j.trc.2014.06.001
- López, G., Martínez, I., Camacho-Torregrosa, F.J., García, A., 2019. Analysis of Cyclists Perception and Behaviour on Two-Lane Rural Roads through an Online Survey, in: *98th Annual Meeting of the Transportation Research Board.* Washington, D.C., January 13–17.
- López, G., Pérez-Zuriaga, A.M., Moll, S., García, A., 2020. Analysis of Overtaking Maneuvers to Cycling Groups on Two-Lane Rural Roads using Objective and Subjective Risk. *Transp. Res. Rec.* 2674 7 . doi:10.1177/0361198120921169
- Luttinen, R.T., 2001. Percent time-spent-following as performance measure for two-lane highways. *Transp. Res. Rec.* 1776 . doi:10.3141/1776-07
- Mackenzie, J.R.R., Dutschke, J.K., Ponte, G., 2021. An investigation of cyclist passing distances in the Australian Capital Territory. *Accid. Anal. Prev.* 154. doi:10.1016/j.aap.2021.106075
- Makridis, M., Mattas, K., Mogno, C., Ciuffo, B., Fontaras, G., 2020. The impact of automation and connectivity on traffic flow and CO2 emissions. A detailed microsimulation study. *Atmos. Environ.* 226 September 2019 . doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117399
- Mecheri, S., Rosey, F., Lobjois, R., 2020. Manipulating constraints on driver-cyclist interactions in a fixed travel space: Effects of road configuration on drivers' overtaking behavior. *Saf.*

- Sci. doi:10.1016/j.ssci.2019.104570
- Ministerio Cultura y Deporte, 2021. Encuesta de Hábitos Deportivos en España 2020. Síntesis de resultados. Boletín Of. del Estado 25.
- Ministerio de Cultura y Deporte, 2021. Anuario de estadísticas deportivas 2021.
- Ministerio de Transportes Movilidad y Agenda Urbana, 2019. anuario estadístico 2018.
- 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 Of. del Estado pp.45684-45772.
- Mohammed, H., Bigazzi, A.Y., Sayed, T., 2019. Characterization of bicycle following and overtaking maneuvers on cycling paths. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 98. doi:10.1016/j.trc.2018.11.012
- Mohammed, H., Sayed, T., Bigazzi, A., 2021. Microscopic modeling of cyclists on off-street paths: a stochastic imitation learning approach. *Transp. A Transp. Sci.* doi:10.1080/23249935.2020.1870178
- Moll, S., García, A., 2019. Characterization of Traffic Operation on 2+1 Roads using Microsimulation with Field Data, in: Graduate Student Research Summaries in Geometric Design. 98th Annual Transportation Research Board (TRB) Meeting.
- Moreno, A.T., Llorca, C., García, A., Sayed, T., 2014. Field Evaluation of Traffic Performance Measures for Two-Lane Highways in Spain, in: 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- Nazemi, M., van Eggermond, M.A.B., Erath, A., Schaffner, D., Joos, M., Axhausen, K.W., 2021. Studying bicyclists' perceived level of safety using a bicycle simulator combined with immersive virtual reality. *Accid. Anal. Prev.* 151. doi:10.1016/j.aap.2020.105943
- Organización de Naciones Unidas, 2015. Memoria del Secretario General sobre la labor de la Organización. *Nac. Unidas* 11, 1–88.
- Pérez-Zuriaga, A.M., Camacho-Torregrosa, F.J., García, A., Marín-Morales, J., Guixeres, J., Alcañiz, M., 2021. Estudio de la percepción del riesgo de ciclistas en carreteras con realidad virtual, in: XIV Congreso de Ingeniería Del Tráfico.
- Quispe Cahyña, E.R., 2016. Micro-simulación de ciclistas empleando VISSIM 8: un caso aplicado en la ciudad de Lima.
- Rasch, A., Boda, C.N., Thalya, P., Aderum, T., Knauss, A., Dozza, M., 2020a. How do oncoming traffic and cyclist lane position influence cyclist overtaking by drivers? *Accid. Anal. Prev.* 142. doi:10.1016/j.aap.2020.105569
- Rasch, A., Panero, G., Boda, C.N., Dozza, M., 2020b. How do drivers overtake pedestrians? Evidence from field test and naturalistic driving data. *Accid. Anal. Prev.* 139. doi:10.1016/j.aap.2020.105494
- Red de Ciudades por la Bicicleta, 2019. Barómetro de la bicicleta en España 111.
- Robertson, J., Hawkins, H.G., 2013. Shared roadway implementation guidance. *J. Transp. Eng.* 139 8 . doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000563
- Rossi, R., Orsini, F., Tagliabue, M., Di Stasi, L.L., De Cet, G., Gastaldi, M., 2021. Evaluating the impact of real-time coaching programs on drivers overtaking cyclists. *Transp. Res. Part F*

- Traffic Psychol. Behav. 78. doi:10.1016/j.trf.2021.01.014
- Rubie, E., Haworth, N., Twisk, D., Yamamoto, N., 2020. Influences on lateral passing distance when motor vehicles overtake bicycles: a systematic literature review. *Transp. Rev.* 40 6 . doi:10.1080/01441647.2020.1768174
- Savolainen, P.T., Gates, T.J., Todd, R.G., Datta, T.K., Morena, J.G., 2012. Lateral Placement of Motor Vehicles When Passing Bicyclists: Assessing Influence of Centerline Rumble Strips. *Transp. Res. Rec.* 2314 1 .
- Schramm, A., Haworth, N., Heesch, K., Watson, A., Debnath, A., 2016. EVALUATION OF THE QUEENSLAND MINIMUM PASSING DISTANCE ROAD RULE.
- Strava, 2020. Año deportivo 2020.
- Strava, 2019. Año deportivo 2019.
- Transportation Research Board, 2018. Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance, Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance. National Academies Press. doi:10.17226/25179
- Transportation Research Board, 2016. Highway capacity manual, Chapter 15. Two-Lane Highways. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000746.
- Twaddle, H., Schendzielorz, T., Fakler, O., 2014. Bicycles in urban areas: Review of existing methods for modeling behavior. *Transp. Res. Rec.* 2434. doi:10.3141/2434-17
- Universitat de València, 2016. Análisis de la siniestralidad en ciclistas: 2008-2013.
- Vehtari, A., Gelman, A., Gabry, J., 2017. Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC. *Stat. Comput.* 27 5 . doi:10.1007/s11222-016-9696-4
- Vlahogianni, E.I., 2013. Modeling duration of overtaking in two lane highways. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 20. doi:10.1016/j.trf.2013.07.003
- Ziemke, D., Metzler, S., Nagel, K., 2019. Bicycle traffic and its interaction with motorized traffic in an agent-based transport simulation framework. *Futur. Gener. Comput. Syst.* 97. doi:10.1016/j.future.2018.11.005

Conclusión

En la presente Tesis Doctoral se ha analizado la afección sobre la funcionalidad del tráfico causada por la presencia de ciclistas en carreteras convencionales. En la primera parte se ha realizado una revisión del estado del arte en cuanto a investigaciones relacionadas con las interacciones entre ciclistas y vehículos motorizados en carreteras convencionales, así como a normativas aplicables, y a las metodologías que permiten caracterizar la funcionalidad del tráfico. En la segunda parte se han definido los objetivos e hipótesis de la tesis y se ha presentado la metodología empleada, desarrollando la ejecución experimental de esta metodología. La tercera parte abarca el análisis de los resultados obtenidos y la discusión de estos, que han derivado en las conclusiones obtenidas. Seguidamente, se han propuesto recomendaciones y mejoras que permiten integrar a los ciclistas en las carreteras convencionales de manera segura y eficaz. Finalmente se han planteado algunas líneas de investigación que permitirán superar algunas de las limitaciones de la presente tesis y ampliar el conocimiento en este ámbito.

Así pues, cabe señalar que se han alcanzado todos los objetivos definidos en la Tesis Doctoral. Se ha caracterizado 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, y se ha calibrado y validado con datos observados, permitiendo obtener medidas de desempeño que han caracterizado correctamente la afección sobre la funcionalidad del tráfico causada por los ciclistas en carreteras convencionales.

De esta manera concluye la presente investigación, presentada como Tesis Doctoral de la alumna Sara Moll Montaner.

Valencia, a 14 de octubre de 2021



Sara Moll Montaner

Anexo A

En este Anexo se presentan las publicaciones científicas propias relacionadas con el desarrollo de la Tesis Doctoral.

En los apartados A.1, A.2 y A.3 se enumeran las publicaciones en revistas indexadas y las participaciones en congresos internacionales y nacionales respectivamente. Se han subrayado las publicaciones que están directamente relacionadas con la tesis, mientras que las demás aportaciones han formado parte del proyecto Bike2lane o Safe4Bikes en las que ha colaborado la doctoranda, estando relacionadas con la presencia de ciclistas en carreteras convencionales, pero no directamente con el análisis de la funcionalidad.

A.1 Publicaciones en revistas indexadas

1. Rasch, A., Moll, S., López, G., García, A., Dozza, M., 2021. Drivers overtaking cyclists—How do their safety perceptions compare?. *Transport Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. (In review).
2. 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*, Vol. 160, 106317, ISSN 0001-4575, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106317>
3. 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*, 13(3), 1235; DOI: <https://doi.org/10.3390/su13031235>
4. López, G., Pérez-Zuriaga, A. M., Moll, S., García, A., 2020. Analysis of Overtaking Maneuvers to Cycling Groups on Two-Lane Rural Roads using Objective and Subjective Risk. *Transportation Research Record*, 1-13. ISSN 0361-1981. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198120921169>

A.2 Participaciones en congresos internacionales

1. Moll, S., López, G., García, A., 2021. Impact on traffic operation by cyclists sharing two-lane rural roads from naturalistic observations. *9th International Cycling Safety Conference (ICSC)*, Lund, Sweden. Accepted.
2. Moll, S., López, G., Llopis-Castelló, D., García, A., Dols, J. F., Molina, J., 2021. Study of the influence of vehicle-bicycles interaction on two-lane rural roads through a driving simulator. *9th International Cycling Safety Conference (ICSC)*, Lund, Sweden. Accepted.
3. Moll, S., López, G., García, A., 2020. Analysis of Duration of Overtaking to Cyclists on Two-Lane Rural Roads. *In Transportation Research Board (TRB) 99th Annual Meeting*, Washington DC, USA.
4. López, G., Pérez-Zuriaga, A. M., Moll, S., García, A., 2020. Analysis of Overtaking Maneuvers to Cycling Groups on Two-Lane Rural Roads Using Objective and Subjective Risk. *In Transportation Research Board (TRB) 99th Annual Meeting*, Washington DC, USA.
5. Moll, S., García, A., 2019. Characterization of traffic operation on 2+1 roads using microsimulation with field data. *In Transportation Research Board (TRB) 98th Annual Meeting*, Washington DC, USA.

6. Pérez-Zuriaga, A. M., Moll, S., López, G., García, A., 2019. Drivers' behavior when passing cyclists riding in line in two-lane rural roads. *In Transportation Research Board (TRB) 98th Annual Meeting*, Washington, USA.
7. Pérez-Zuriaga, A. M., López, G., Moll, S., García, A., 2018. Drivers behaviour overtaking a bicycle peloton on two-lane rural roads. *In 7th International Cycling Safety Conference (ICSC)*, Barcelona, Spain.
8. Camacho-Torregrosa, F. J., López, G., Moll, S., Pérez-Zuriaga, A. M., Llopis-Castelló, D., Lowry, M., 2018. Identification of cyclist volume patterns in Spain using observations and Strava data. *7th International Cycling Safety Conference (ICSC)*, Barcelona, Spain.

A.3 Participaciones en congresos nacionales

1. Moll, S., López, G., García, A., 2021. Afección de la presencia de ciclistas en carreteras convencionales estrechas. Adaptación de un modelo de microsimulación. *En XIV Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2021)*. Online, España
2. Dols, J. F., Molina, J., Moll, S., López, G., Camacho-Torregrosa, F. J., García, A., 2021. Analysis of the Vehicle-Bicycles Interaction on Two-Lane Rural Roads Using a Driving Simulator Based on Field Data. *En XIV Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2021)*. Online, España.
3. Moll, S., 2019. Estudio de la maniobra de adelantamiento a pelotones ciclistas en carreteras convencionales. *En III Campus Científico del Foro de Ingeniería del Transporte*. Cercedilla, España.
4. López, G., Camacho-Torregrosa, F. J., Moll, S., García, A., 2018. Estimación de la demanda ciclista en carretera usando datos de la plataforma Strava. *XIII Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT)*, Gijón, Spain.
5. Moll, S., 2017. Aplicación de Aimsun para la caracterización de la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1. Aplicación a la CV-55 entre los PK 23+700 y 24+660. *En Aimsun Users Meeting*. Valencia, Spain.

Anexo B

To qualify for the mention of International Doctor some chapters of this PhD have been written in English.

PhD title: “Analysis of traffic operation on two-lane rural roads with presence of cyclists”.

The PhD parts written in English have been:

- Summary
- Chapter 1. Introduction
- Chapter 3. Objectives, hypothesis and scope
- Chapter 7. Conclusions

Chapter 1

Introduction

Background

In this PhD, an investigation has been developed in order to determine how the presence of cyclists on two-lane rural roads affects the traffic operation. To this end, two field data collection methodologies have been developed and carried out to model and analyse the phenomenon in order to obtain the results and conclusions presented in this document.

The PhD has been directed by the Prof. Dr. Alfredo García García, and by the Prof. Dr. Griselda López Maldonado, both from the Universitat Politècnica de València (UPV).

This doctoral thesis has been carried out thanks to a pre-doctoral contract with the Universitat Politècnica de València developed at the Institute of Transport and Territory. This contract is linked to an "Aid for pre-doctoral contracts for the training of doctors" from the State Research Agency with reference BES-2017-080474, linked to the research project with reference TRA2016-80897-R "Improvement of safety and operation of two-lane rural roads with cyclists (Bike2lane)". This PhD covers a part of this research project, specifically focusing on the analysis of the influence of bicycle traffic on traffic operation on two-lane rural roads and the modelling of the phenomenon. The author of the PhD has actively collaborated in the development of the entire Bike2lane project, carried out by the Highway Engineering Research Group (HERG) of the UPV.

During the development of the PhD, the doctoral student carried out a research stay at the Unit on Crash Analysis and Prevention of the Chalmers University of Technology in Göteborg (Sweden). This research stay took place between January and April 2021, under the supervision of Dr. Marco Dozza. The duration of this stay was three months, and together with the writing of part of the PhD in English, it fulfils the requirements to qualify for the International Doctorate.

Introduction

On Spanish two-lane rural roads, the presence of cyclists has increased considerably in recent years. These cyclists use interurban roads mainly for sport cycling, proof of which is the increase in sports licenses for federated cyclists, which in 2020 reached 75,638 federated licenses and 3,634 federated cycling sports clubs (Ministry of Culture and Sport, 2021). In fact, cycling is the second most practiced sport in Spain, with 49.8% of households using bicycles (Ministry of Culture and Sport, 2021). In the Comunitat Valenciana, due to the good climatic and orographic conditions it offers, road cycling is common, both for individual cyclists and for groups of cyclists.

However, most two-lane rural roads have been designed considering only motorized vehicles, and many of them lack specific infrastructure for cyclists and often even a shoulder. Two-lane rural roads account for 90% of the road network in Spain (Directorate General of Traffic, 2019). In the Diputació de València, 65% of the rural roads with a non-existent or impassable shoulder present a cross-section width of less than 7 m (Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda, 2019), and many of them have a high presence of cyclists. A study carried out by the University of Valencia, based on data on accidents involving cyclists between 2008 and 2013 in Spain provided by the General Directorate of Traffic, concluded that 78% of these accidents occurred on roads with non-existent or impassable shoulder (Universitat de València, 2016), which shows that many of the roads where motorized vehicles and bicycles interact are

secondary with narrow or non-existent shoulder. On these types of roads, overtaking cyclists implies a greater invasion of the opposite direction, which can create more dangerous situations.

This use of the rural roads by cyclists creates a new model of traffic, in which the different users must coexist and adapt to each other. The traffic of bicycles and their interaction with motorized vehicles on two-lane rural roads is regulated in Spain by the General Traffic Regulations (Ministerio del Interior, 2003). According to these Regulations, bicycles must ride on the shoulder, if there is present, or as close as possible to the right edge of the road. Two cyclists are allowed to ride two abreast as long as there is sufficient visibility. Motorized vehicles must maintain a lateral distance of 1.5 m when overtaking cyclists, being able to invade the opposite lane even with solid line when there is sufficient visibility.

Bicycles and motor vehicles have a notable difference in their speed, creating numerous reaches from motor vehicles to bicycles increasing the need to overtake them. The differences that exist between these users in terms of volume and level of protection make overtaking manoeuvres potentially dangerous and can have consequences on road safety, especially for cyclists, who are the most vulnerable road users. In 2019, 7,837 accidents with cyclists involved were registered in Spain, although the majority occurred on urban roads (72%), 60% of the fatalities were registered on interurban roads, with 48 cyclists killed on this type of road, 5 more than in 2018 (General Traffic Directorate, 2019).

The presence of cyclists not only affects safety, but can also affect the traffic operation when considering the interaction between cyclists and motorized vehicles. This interaction results in speed reductions of motorized vehicles when encountering bicycles. The speed difference between cyclists and drivers generates overtaking needs, since motor vehicle drivers aim to travel at their desired speed. Therefore, overtaking has an effect on traffic conditions and can improve traffic quality. However, overtaking manoeuvres to cyclists has generally been studied from a safety point of view, and previous studies that have analysed the influence of cycle traffic on the operation of traffic on two-lane rural roads are unknown. On the other hand, the study of overtaking manoeuvres considering cyclists riding in groups is very limited, and the habitual presence of groups of cyclists on rural roads makes it necessary to extend the knowledge by considering groups of cyclists.

One of the main objectives of this research is to characterize the interaction between cyclists and other road users on rural roads, specifically to characterize the overtaking manoeuvre of motorized vehicles to bicycles. This manoeuvre is considered to be the most dangerous interaction between these two users due, above all, to the difference in speeds that exists between them and to the vulnerability of cyclists in terms of protection systems. To correctly characterize the overtaking manoeuvre to cyclists, it is necessary to collect information from previous studies. It is then necessary to define the study variables that allow the manoeuvre to be characterised and to design a data collection methodology that allows the greatest number of variables to be collected in a naturalistic way.

All the experimental data will be used to characterize the overtaking manoeuvre to cyclists, which will serve as a basis for implementing a traffic microsimulation model to extend the study to other traffic and road conditions. The performance measures that best characterize the traffic operation of a road with cycle traffic will be determined. These performance measures will be based on those proposed by the Highway Capacity Manual (Transportation Research Board, 2016), defining, if necessary, new measures that adapt to these users and their interactions.

Finally, measures and recommendations will be proposed to improve safety and traffic operation on two-lane rural roads with presence of cyclists.

Document organization

This document is organised in 7 chapters and 3 annexes. Chapter 1 presents the background and an introduction to the problem and the need for the study.

Chapter 2 refers to a study of the state of the art in the field in which the thesis is developed, reviewing publications and previous knowledge related to the presence of cyclists and their associated accidents on the road, existing regulations and the study of interactions between cyclists and motor vehicles on two-lane rural roads. Current knowledge on traffic microsimulation models incorporating cyclists and on the analysis of traffic operation has also been reviewed.

Chapter 3 presents the main objective and the specific objectives of the thesis, as well as the main hypotheses and the scope of this doctoral thesis.

Chapter 4 includes the methodology of the research carried out, in particular the data collection and reduction, as well as the methodology of adaptation, calibration and validation of the traffic microsimulation model used. The experimental implementation of the described methodology is also described.

Chapter 5 shows the main results obtained in this research, as well as an analysis of these results. In chapter 6 a discussion of the results obtained is carried out, and together with them the conclusions of the thesis are established, which are presented in chapter 7. Likewise, this chapter also includes the specific recommendations and proposals for improvement derived from the conclusions of this thesis and suggests future lines of research that may be of great interest to deepen the results obtained in the thesis.

During the development of the doctoral thesis, a total of 13 contributions of results presented at national and international congresses have been generated, as well as 2 scientific articles published in research journals. These contributions are detailed in Annex A, and in particular the articles published in scientific journals are attached as Annex C. Annex B contains the compendium of chapters translated into English.

Chapter 3

Objectives, hypotheses and scope

The main objective of this PhD is to analyse the effect on the traffic operation caused by the presence of cyclists on two-lane rural roads. For this, it is necessary to base the research on experimental observation of the interactions between motorized vehicles and bicycles, as well as to review the performance measures that determine traffic operation on these roads and to incorporate, if necessary, new measures that better represent the phenomenon.

This main objective was divided into the following specific objectives:

- The study of previous research related to bicycle traffic on two-lane rural roads and its influence on the safety and operation of traffic on these roads, as well as a review of the specific regulations on cycle traffic.
- The observation of the usual configurations in which groups of cyclists ride on rural roads, as well as the temporal variation of cycle demand.
- The design and development of an experimental methodology to study the interaction between bicycles and motorized vehicles on two-lane rural roads, especially during overtaking manoeuvre. This methodology will be based on instrumented bicycles equipped with different devices and the subsequent processing of the recorded data.
- The execution of the data collection, using the methodology developed, on different sections of two-lane rural roads and considering different configurations of the group of cyclists, both in the number and in the configuration in-line and two-abreast, obtaining a sufficient sample of data related to overtaking manoeuvres.
- The descriptive analysis of the overtaking manoeuvre and of all the factors involved in it which have been obtained through the experimental study.
- The development of a model for the duration of overtaking to cyclists considering factors related to the road, the group of cyclists and the overtaking manoeuvre itself.
- The development of a data collection methodology that allows characterizing the traffic operation in sections of two-lane rural road with cyclist traffic, obtaining the necessary variables and the traffic scenarios observed.
- The adaptation of a traffic microsimulation model to the presence of both individual and grouped cyclists, and their interaction with motorized vehicles. This model will be calibrated and validated with the observations realized in the different road sections, and will allow the simulation of different scenarios, both traffic and geometric, to evaluate the operation of the traffic under different conditions.
- The review of the performance measures used in the current methodology to characterize the operation of the traffic on two-lane rural roads, and the proposal of performance measures which better explain the phenomenon, if necessary. The variation of each performance measure will be analysed as cycle demand varies.

This research aims to characterize the interaction between motorized vehicles and bicycles on two-lane rural roads, especially during the overtaking manoeuvre to cyclists. There are many hypotheses that can be handled in relation to overtaking cyclists due to the large number of factors that can influence the phenomenon. In this research, in addition, when considering the possibility of cyclists riding in groups, the number of hypotheses is greater.

The hypotheses that will be contrasted throughout the development of the PhD are:

- H1: The data collection methodology using instrumented bicycles allows obtaining the necessary variables to characterize the overtaking manoeuvre to cyclists.
- H2: The section of the rural road influences the type of overtaking manoeuvre, registering a greater number of flying manoeuvres in more favourable sections with higher lane and shoulder widths. In unfavourable sections, with narrow or impassable shoulders, the number of accelerative manoeuvres will be greater.
- H3: In unfavourable sections the invasion of the opposite lane will be higher, since drivers must ensure that there is no vehicle in the opposite direction to carry out the manoeuvre.
- H4: The current level of compliance with the regulation on the minimum lateral clearance of 1.5 m necessary to overtake cyclists is high.
- H5: On rural roads with less favourable sections, cyclist groups will mostly ride in-line configuration.
- H6: Overtaking a group of cyclists will be safer than an isolated cyclist, presenting higher lateral clearance and lower overtaking speed.
- H7: The duration of overtaking will be higher for groups formed by more cyclists and for the on-line configuration of the groups.
- H8: Rural roads with higher speed limits and AADT will have a lower overtaking duration.
- H9: Cyclists riding in a group will increase overtaking on tangents, reducing it in curves, compared to an isolated rider.
- H10: The duration of the overtaking manoeuvre will be lower on tangents than on curves.
- H11: Visibility of oncoming vehicles can change the behaviour of overtaking drivers. When the oncoming vehicle is visible, the overtaking driver will be more conservative than when it is not, performing more accelerative manoeuvres.
- H12: Groups of cyclists circulate as a single vehicle, since its components circulate at the same speed during the travel of a rural road segment.
- H13: The presence of cyclists on rural roads reduces the average travel speed of motorized vehicles.
- H14: Performance measures related to users platooning will be more affected by the presence of cyclists than those related to speed.
- H15: When cyclist groups ride in-line, their influence on the traffic operation is higher than when they ride two-abreast.

Regarding the objectives and hypothesis, and also during the development of the PhD, some limitations have been observed that have defined its scope:

- The study of overtaking maneuvers to cyclists has been restricted to sections of rural roads with two lanes; intersections or sections where special lanes are available have not been considered.
- The observation of overtaking maneuvers to cyclists has only been carried out on two-lane rural roads next to Valencia city area.
- The overtaking maneuvers to cyclists analyzed in this PhD have been carried out with passenger cars. In order to extend the conclusions to heavy vehicles and motorcycles, it is advisable to obtain a broader sample of overtaking carried out by this type of vehicle.
- The rural road in which the study has been carried out are mostly flat roads or with reduced slopes.
- The results of this study are limited to the geometry and traffic characteristics of the rural roads where the data were collected, to the traffic scenarios designed and to the factors analyzed.

Chapter 7

Conclusions and recommendations

Conclusions

The main conclusions of the PhD are included in this section. They have been classified according to the different parts developed in the investigation.

Conclusions of the **data collection methodologies** used:

- The use of instrumented bicycles allows to collect sufficient variables to characterize the overtaking maneuver to cyclists on two-lane rural roads. A total of 2,135 overtaking maneuvers have been characterized, considering seven configurations of the group of cyclists and five sections of two-lane rural road with different geometric and traffic characteristics.
- Simultaneous recordings at the extremes of the study sections allows the collection of the necessary data to characterize traffic, both motorized and cyclist, obtaining various performance measures to analyze traffic operation. The study was conducted on two sections of two-lane rural road and a total of 737 cyclists and 2,023 motorized vehicles were registered.

Regarding the **overtaking maneuver to cyclists**:

- The overtaking vehicle type influences the main variables of the overtaking maneuver. In this PhD, only overtaking manoeuvres realized by passenger cars have been considered.
- Flying overtaking manoeuvres (79%) are predominated compared to accelerative (9%) and piggy backing manoeuvres (12%). More accelerative manoeuvres were recorded on narrow roads and in larger groups of cyclists riding two-abreast.
- Most overtaking manoeuvres were performed without a visible oncoming vehicle. On roads with an unfavourable cross-section and when overtaking large groups of cyclists, the presence of an oncoming vehicle during the overtaking manoeuvre was minor.
- The invasion of the opposite lane was higher for overtaking manoeuvres realized on narrower roads and when overtaking groups of cyclists riding two-abreast.
- Higher overtaking vehicle speeds were recorded on two-lane rural roads with higher speed limits. The average travel speed of overtaking vehicles respected the speed limit in all the study roads.
- The lateral clearances registered did not respect the required minimum of 1.5 m in 27% of cases. This result presents an improvement on data recorded in previous research, demonstrating increased awareness of drivers and increased in compliance with regulations in recent years.
- The duration of the overtaking to cyclists is considered a key factor from the point of view of safety and operation of traffic on two-lane rural roads. Higher durations represent more time in the opposite lane, where the risk of a head-on collision with oncoming traffic is higher, while very low durations may represent a hazard from a cyclist's point of view. On the other hand, overtaking duration determines the number

of overtaking carried out, especially in situations of high traffic or low visibility. Therefore, it is necessary to analyse in depth the duration of overtaking to cyclists on two-lane rural roads.

About the **model of duration of overtaking to cyclists**:

- Flying manoeuvres showed, in general, lower duration of overtaking, higher overtaking speed and lower lateral clearance than accelerative manoeuvres. Due to these differences, two overtaking duration models were developed and validated, one for each type of manoeuvre.
- Flying manoeuvres presented a lower percentage of invasion of the opposite lane (77%) compared to accelerative manoeuvres (93%). This fact, in addition to the lower duration of overtaking, implies that flying manoeuvres are preferred by the drivers.
- The Bayesian models developed presented a good fit for both flying and accelerative manoeuvres. The models selected were those that considered the log-normal distribution and all the factors analysed related to the road, the group of cyclists and the manoeuvre itself.
- The width of the lane and shoulder should be considered together, as this is the total space in which motorized vehicles and bicycles interact. Wider two-lane rural roads had lower overtaking durations. Wider shoulders offer more lateral clearance and lower overtaking duration, in consequence they can be considered a safe countermeasure from the point of view of both drivers and cyclists.
- The duration of overtaking was higher in the groups with more cyclists in both overtaking strategies. The number of cyclists in the group also influences the choice of strategy, such that with more cyclists in the group, more accelerative manoeuvres were observed.
- Groups of cyclists riding two-abreast presented higher overtaking durations than those riding in-line in flying manoeuvres due to the higher displacement of the driver during the manoeuvre, whereas in accelerative manoeuvres, when cyclists rode two-abreast generated lower overtaking durations.
- Lower overtaking durations were observed when an oncoming vehicle was present for both strategies. However, 80% of the accelerative manoeuvres were carried out without the presence of an oncoming vehicle, compared to 69% of the flying manoeuvres, implying that the presence of an oncoming vehicle induces more drivers to choose the accelerative manoeuvre.
- Higher overtaking durations were observed with lower speeds of the overtaking vehicle and with higher lateral clearances. However, for flying manoeuvres a higher mean value and a narrower credibility interval of the lateral clearance parameter were obtained, indicating a strong effect of lateral clearance on the duration of overtaking for this type of manoeuvre.
- The overtaking duration models developed in this investigation can be used to obtain predictive values considering other configurations of groups of cyclists or other characteristics of the road. These predictions can be used as input to traffic microsimulation models to calibrate the effective lengths of groups of cyclists other than those observed, increasing the validity of the microsimulation studies.

Analysis of the **operation of traffic on two-lane rural roads with presence of cyclists:**

- From the **naturalistic observations** at the extremes of the study rural road sections, the following conclusions were drawn:
 - From the data collection at the beginning and at the end of the road section, the average travel speed of each motorized vehicle and each bicycle was obtained, observing a decrease in the average travel speed of motorized vehicles as they overtake more cyclists. When overtaking groups of cyclists, the decrease in average travel speed for motorized vehicles was more pronounced.
 - The number of performance measures obtained using this methodology is limited, so it is necessary to use other tools to obtain performance measures at the microscopic level of users.
 - Field data collection offers few possibilities to analyse traffic operation, since the observed traffic scenarios hardly adopt extreme values and therefore the range of observed traffic scenarios is not very high.
 - These observations are necessary to understand the behaviour of different users on the rural road, and to collect data to calibrate and validate other tools to increase both the range of traffic scenarios observed and the performance measures obtained.
- About the **traffic microsimulation model:**
 - The existing module in Aimsun Next to simulate overtaking manoeuvres on two-lane rural roads has been adapted to consider the behaviour of cyclists, motorized vehicles and their interaction. One of the key features of this adaptation is the calibration of the equivalent lengths of each group of cyclists to achieve overtaking durations similar to those observed in the field, thus representing the partial invasion of the opposite lane during overtaking. The groups of cyclists can be considered as a single user on road sections without slope, since their members circulate at the same speed and maintain the configuration as observed in the field. Other adaptations of the model have consisted in discretizing the cyclists, allowing to overtake them even with a solid line and in only two simulation steps to achieve lower overtaking durations.
 - The calibration and validation processes of the traffic microsimulator are essential to ensure that the model correctly represents reality. The model has been calibrated at the microscopic level, with the overtaking data collected to the different groups of cyclists, and at the macroscopic level, with data on the average travel speed of motorized vehicles, time headways between vehicles and percent followers at the extremes of the rural road sections.
 - The use of traffic microsimulation models, properly adapted, calibrated and validated, makes it possible to study the effect that the presence of cyclists has on certain performance measures that characterize the safety and operation of traffic on two-lane rural roads, being some of these performance measures difficult to obtain in the field.
 - The methodology developed in this research, to adapt, calibrate and validate a model that allows the interaction between drivers and cyclists to be recreated in microsimulation, can be extrapolated to the study of other roads with

different geometric and traffic characteristics, as long as particular field data are collected on the roads to be analysed.

- **By simulating the observed traffic scenarios**, the following conclusions have been reached:
 - The effect on the average travel speed of passenger cars is confirmed, the average travel speed decreases as the volume of cyclists increases.
 - The number of overtaking manoeuvres realized by passenger cars increased as bicycle volume increased.
 - The delay time of motorized vehicles during their travel through the rural road section was increased when simulating scenarios with higher volume of cyclists.
 - The percent followers at the entrance and exit points of the study road sections showed higher values for the scenarios with higher volume of cyclists.
- Based on the **use of the microsimulation model** to simulate the traffic scenarios designed, different performance measures have been characterized, obtaining the following conclusions:
 - For all the performance measures analysed, the presence of cycle traffic affects their result in such a way that, as cycle traffic increases, the values of these measures represent a worsening of the traffic operation.
 - An increase in cycle traffic on the road translates into a reduction in the average travel speed of motorized vehicles, an increase in the delay time of motorized vehicles and an increase in the percent followers at the exit of the road section. The number of overtaking manoeuvres performed per vehicle increases as more bicycles are incorporated into the section, reaching a maximum for a certain level of cycle traffic, after which it decreases. This study has also characterized the follower density at the exit of the road section, showing an increase in this performance measure as the cycle traffic on the road increases.
 - The presence of cyclists affects the operation of traffic mainly due to the difference in speeds between bicycles and motorized vehicles, increasing the need for overtaking and generating delays for passenger cars due to following of bicycles before overtaking.
 - The results obtained for the two rural road sections analysed in terms of the sensitivity analysis of the performance measures with respect to the variations in cycle traffic are similar. The performance measure with the higher sensitivity to the incorporation of cyclists on the road was the number of overtaking manoeuvres performed per vehicle, followed by the measures related to the delay of passenger cars, presenting a variation rate slightly higher the delay than the percentage of delay respect to the travel time. The performance measures related to the platooning between users showed lower rates of variation than the previous measures, with follower density showing a higher sensitivity than the percent followers at the exit of the road section. The average travel speed of passenger cars was the least sensitive to the incorporation of cyclists on the road for all the cases analysed.
 - As the level of motorized traffic increases in these two road sections, the performance measures analysed show less variation due to the presence of cyclists on the road. This is because motorized traffic itself already assumes high

values for these performance measures. However, the effect of the cyclists follows the same line as in the scenarios with less motorized traffic.

- Regarding the differences observed between the two road sections, the values are not comparable, as each road has different geometric and traffic characteristics. However, it is observed that on the narrow rural road, corresponding to CV-502, for average motorized traffic, the differences between the rates of change in the number of overtaking manoeuvres and the measures related to delay are lower than those registered on the wider rural road corresponding to CV-310. This means that on narrow roads the number of overtaking manoeuvres is lower than on wider roads, which generates more delays for motorized vehicles.
- The differences between the in-line and two-abreast configurations in which the groups of cyclists ride are generally not significant, only for the number of overtaking manoeuvres performed per vehicle is this difference significant in the scenarios of lower motorized traffic for narrow roads, with more overtaking manoeuvres being obtained when the groups ride two-abreast due to their shorter length. This result indicates that, on narrow roads, riding in groups two-abreast facilitates overtaking, thus improving traffic operation in these conditions, and therefore riding in groups two-abreast on narrow roads has been suggested.
- For the same number of cyclists, their distribution in larger groups has had a lower effect on traffic operation, reducing the number of overtaking manoeuvres required and generally improving the other performance measures. Therefore, in general, larger groups of cyclists are preferred to the same cyclists riding individually, as they involve fewer interactions and thus less affect the traffic operation. However, when the cycle and motorized demands are higher, the circulation of medium-sized groups are more advisable, since they represent a compromise between the number of groups and the time needed to overtake them.
- The reduction of the speed limit for passenger cars only during overtaking manoeuvres has resulted in a clear deterioration of safety and traffic operation on the road. The implementation of this speed reduction has generated a reduction in the average travel speed, an increase in the delay time and a reduction in the number of overtaking manoeuvres per vehicle. This measure has also generated an increase in the overtaking durations of the different groups of cyclists, thus increasing the time in which the overtaking vehicles travel in the opposite lane, increasing the level of exposure to the risk of head-on collision with oncoming vehicles. The percentage of time a vehicle has to drive in the opposing lane in relation to the total travel time increases by 6% when reducing the speed during the overtaking by 20 km/h. On the other hand, reducing the speed limit only during the overtaking manoeuvre also generates more variations in the speed of the motorized vehicles during the travel, being these oscillations annoying for drivers.
- Reducing the speed limit on the road penalises traffic operation, as the average speed of motorized vehicles is reduced, increasing the duration of overtaking.

However, the number of overtaking manoeuvres per vehicle is reduced as each vehicle interacts with fewer cyclists. This measure is intended to increase safety for cyclists, as overtaking will occur at lower speeds. Reducing the speed limit means longer overtaking times, increasing exposure to the risk of head-on collision with oncoming vehicles during opposing lane invasion, however, this measure also means a reduction in the number of overtaking manoeuvres performed, thereby reducing risk exposure, resulting in an overall improvement in risk exposure as a percentage of time spent on the section of road.

This research allows for a complete study of the overtaking manoeuvre to cyclists on two-lane rural roads, analysing in depth the duration of the overtaking manoeuvre, as it has been shown to be a particularly important variable in terms of safety and traffic operation on rural roads with presence of cyclists. Additionally, a study of various performance measures has been carried out to characterize the effect on the operation of traffic caused by the presence of cyclists. This analysis has been carried out using a traffic microsimulation model, properly adapted to the circulation of cyclists in groups, as well as to their interaction with motorized vehicles, and which has been calibrated and validated based on observed data.

The conclusions described are limited to the scope of the thesis as defined in chapter 3, being valid for two-lane rural roads on flat terrain and for the traffic levels analysed in this research.

Recommendations and proposals for improvement

Based on the results and conclusions obtained in this research, a series of recommendations and proposals for improvement have been formulated with the aim of integrating cyclists into two-lane rural roads in a safe and effective way.

These recommendations and proposals for improvement are:

- Identification of dangerous road sections for both cyclists and drivers and signposting of sections with a high presence of cyclists so that drivers can adapt their behaviour to the presence of cyclists and carry out safer interactions. Active signs for rural roads with high presence of cyclists have evolved considerably in recent years, allowing drivers to be informed of the presence of cyclists on the road in real time, and to adopt measures according to the level of cycle traffic registered at any given time.
- Wider rural road cross-section. Wider roads have been found to offer higher lateral clearances and lower overtaking durations to cyclists, making them safer for cyclists and drivers. Wider shoulders offer higher lateral clearances and lower overtaking durations, improving traffic safety and performance by making overtaking to cyclists easier. This widening of the road section focuses on the shoulders, creating more space for the cyclists. At the same time, lane dimensions can be reduced, forcing drivers to slow down.
- Construction of turnouts for cyclists. To improve the traffic operation on two-lane rural roads with presence of cyclists, it is essential to facilitate the overtaking manoeuvre to cyclists. On narrow roads where it is not possible to widen the cross-section over the entire road section, it is recommended to build specific turnouts where cyclists can move, allowing motorized vehicles to overtake them without interacting with them or invading the opposite lane. These turnouts should be designed in areas where there are queues and in rural roads with high cycle traffic that justify their construction.

- Groups of cyclists riding two-abreast on narrow roads. They have been shown to require lower overtaking duration, which makes overtaking them easier and therefore improves traffic operation.
- Awareness and education campaigns. In order to integrate cyclists and normalize their presence on two-lane rural roads, it is proposed to carry out awareness and education campaigns for the general public, promoting knowledge of the regulations, thus ensuring higher compliance with the minimum separation required when overtaking cyclists and higher respect for cyclists on the road. Cyclists should also be aware of their obligations towards road traffic.
- Reducing speed limits on rural roads and at peak cycle traffic times. Reducing road speed limits increases the safety of cyclists when overtaking them at lower speeds. Lowering the speed limit increases the duration of overtaking, however, it also reduces the number of interactions with cyclists, offsetting the risk exposure of drivers. Nevertheless, reducing speed only during overtaking manoeuvres implies a worsening of the operation of traffic generating speed variations that can be uncomfortable and dangerous, it is also a measure with a complicated compliance control.
- Consider the presence of cyclists in the design of future roads. On the basis of studies to estimate cycle volumes, infrastructures must be built in which there is a specific space for cyclists.
- Frequent maintenance and cleaning of shoulders so that cyclists can ride more safely, avoiding to need to leave the shoulder due to the existence of vegetation or poor condition of the pavement.
- In view of the results obtained on the road section with coloured shoulder, this measure is not recommended, as lower lateral clearances, higher speeds during overtaking and lower overtaking durations than expected for the geometric and traffic characteristics of the road section were observed.

Future research lines

Through the development of this thesis, the knowledge about the interactions between drivers and cyclists on two-lane rural roads has been extended, analysing the effect that cyclists have on the operation of traffic on this type of roads.

However, based on the results and conclusions obtained in this thesis, and above all due to its scope, a series of limitations have been identified which have allowed to propose possible lines of research with the aim of extending knowledge in this field. This section describes the lines of research proposed on the basis of the limitations and shortcomings observed in this research.

The lines of research proposed focus on extending the study to other types of road sections, as well as other types of overtaking vehicles. They are also aimed at extending the use of the traffic microsimulation model, allowing different scenarios to be analysed by varying both the geometric and traffic characteristics. Finally, it is proposed to investigate cyclists' perception of risk and its relationship with variables related to the road, the cyclists and the overtaking manoeuvre itself.

Some lines of future research are proposed below:

1. Extend the research to two-lane rural roads with gradients. On such roads, the speed of cyclists is influenced by the gradient, and the speed difference between drivers and cyclists is high, especially on uphill sections. Under these conditions, the effect on traffic operation may be different from the one obtained in this thesis, and should be analysed on the basis of observations. The methodology developed in this thesis would be applicable to uphill sections, taking field data at the microscopic and macroscopic level, and then modelling the phenomenon in the traffic microsimulator.
2. Extension of the research to overtaking manoeuvres realized by other types of vehicles, mainly heavy vehicles and motorbikes. In this research it was found that these types of motorised vehicles behaved differently when overtaking cyclists, and it was necessary to investigate these differences in depth, focusing on the aerodynamic forces exerted on the cyclists by each type of overtaking vehicle. From the results obtained for each type of overtaking vehicle the effect of varying the percentage of heavy vehicles and motorbikes on each road can be analysed, as this can also influence traffic operation.
3. Modelling of more rural road sections in the traffic microsimulator with the aim of extending the conclusions to more types of rural roads, checking whether the effect on traffic operation is similar on other road sections. To do this, more data needs to be collected with the instrumented bicycles and at the ends of the road sections to obtain the traffic data needed to calibrate and validate the microsimulation model. In this research, the microsimulation models have been developed on two-lane rural road sections with different geometric and traffic characteristics; however, extending the study to other road sections would extend the scope of the study and the conclusions. The study could be extended, in the first instance, to the other three road sections where data was collected with the instrumented bicycles, requiring only macroscopic level data at the ends of the road section.
4. Use of the adapted traffic microsimulation model, calibrated and validated in this research, to simulate scenarios with variations in the geometry of the road. It is proposed to analyse the effect of the incorporation of turnouts to facilitate the overtaking to cyclists. The effect of these turnouts will be studied in terms of their location, as well as their effectiveness in terms of the level of cyclist and motorised traffic on the road. In this way it will be determined at what level of traffic the improvements provided by the turnouts justify their construction, and at what locations their effectiveness is greatest, as well as their optimum lengths.
5. Use of the adapted traffic microsimulation model, calibrated and validated in this research, to simulate scenarios with variations in the size of groups of cyclists considering larger groups. The overtaking duration for groups with a different number of cyclists than observed will be obtained from the overtaking duration model developed in this thesis. This model allows predicting the durations by varying the characteristics of the road, the group of cyclists and the manoeuvre itself. In this way, the effect of large groups of cyclists on traffic operation on rural roads can be analysed.
6. Improvement of the models for each of the performance measures analysed in this research as a function of cycle demand, so that they correctly represent the phenomenon. In the thesis, basic regression models have been obtained, without further analysis. In this sense, the research should be extended in the development of these models, to analyse the sensitivity of each of the performance measures studied

to variations in cycle demand, especially in the interval of cycle demand in which the variation of each performance measure is maximal.

7. Analysis of the relationship between cyclists' subjective perception of risk and the variables analysed in this study, especially lateral clearance, overtaking speed and overtaking duration. During the data collection process with the instrumented bicycles, a device located on the handlebars of the bicycles with five buttons (varying from green to black) was also used, by means of which each cyclist marked the level of perceived risk in each of the recorded overtaking manoeuvres. These data should be exploited, relating the level of risk perceived by cyclists with the rest of the variables obtained for each overtaking manoeuvre, obtaining a predictive model of cyclists' risk perception that allows improvements in road management to be incorporated in order to reduce this risk perception.
8. Comparison of observed data and data obtained in the traffic microsimulator with the data provided in a driving simulator. This line of research has already begun, representing a real rural road section in the driving simulator of the Universitat Politècnica de València. The use of the driving simulator makes it possible to obtain data from the drivers' point of view quickly. Although the driving simulator has been used in several previous research studies on interactions between drivers and cyclists on two-lane rural roads, none of these studies have compared the validity of the data obtained in the traffic simulator with those obtained using other methodologies.

