



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS



**Estudio de la funcionalidad del tráfico en
carreteras 2+1 mediante microsimulación.
Aplicación a la CV-405 entre los P.K. 4+000 y
13+000 (T.M. de Torrent y T.M. de Montserrat,
Valencia)**

Memoria

Trabajo Final de Máster

Titulación: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Curso: 2015/16

Autora: Mercedes Rodríguez Martínez

Tutor: Prof. Alfredo García García

Cotutor externo: Dr. Carlos Llorca García

Valencia, septiembre de 2016

Índice

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
RESUM	9
INTRODUCCIÓN	10
ESTADO DEL ARTE	14
CARRETERAS 2+1	15
MANIOBRA DE ADELANTAMIENTO	26
CARRIL DE ADELANTAMIENTO	30
MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO	32
LIMITACIONES DEL CONOCIMIENTO	38
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	39
OBJETIVOS	39
HIPÓTESIS	40
ALCANCE	41
METODOLOGÍA	42
CREACIÓN DEL ESCENARIO	42
CALIBRACIÓN DEL MODELO	50
VALIDACIÓN	53
ANÁLISIS	54
ANÁLISIS DE ESCENARIOS	54
ESTUDIO DE LA FRECUENCIA DE ADELANTAMIENTOS	55
ESTUDIO DETALLADO DE ADELANTAMIENTOS	57
PORCENTAJE DE VEHÍCULOS EN COLA	59
VELOCIDAD PUNTUAL DE LOS VEHÍCULOS	65
VELOCIDAD MEDIA DE LOS ESCENARIOS	70
CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS	74
CRITERIOS DE DISEÑO DE CARRILES DE ADELANTAMIENTO EN CARRETERAS 2+1	74
APLICACIÓN DEL MODELO A LA CV-405	79
LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL TRAMO DE ESTUDIO	79
PROBLEMÁTICA ACTUAL	81
CONDICIONANTES EXISTENTES	81
PROPUESTA DE SOLUCIÓN	85
METODOLOGÍA	93
CREACIÓN DE ESCENARIOS EN AIMSUN	93
CALIBRACIÓN DE ESCENARIOS	101

ANÁLISIS DE RESULTADOS EN CARRETERA CONVENCIONAL VS CARRETERA 2+1 PARCIAL	103
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	104
PORCENTAJE DE ADELANTAMIENTOS	104
PORCENTAJE DE VEHÍCULOS EN COLA	105
ATS	106
CONCLUSIONES	107
FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	111
CONCLUSIÓN	112
REFERENCIAS	113

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Siniestralidad propuesta según el calendario de Fundación Mapfre. Fuente: Fundación Mapfre.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2. Elementos seguros de un sistema vial. Fuente: Fundación Mapfre.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Detalle sección tipo carretera 2+1. Fuente: Brewer, Venglar, (2010).</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4. Diseño geométrico de carreteras 2+1 en Países Europeos. Fuente: Lee, Kim y Moon, (2010).</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5. Disposición de cámaras de adelantamiento. Fuente: Lee, Kim y Moon, (2010).</i>	<i>18</i>
<i>Figura 6. Configuración de la zona de transición para carretera 2+1. Fuente: Lee, Kim, Moon, (2010).</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7. Gráfico para determinar la longitud de la vía de adelantamiento para una carretera con cierto volumen de tráfico y un porcentaje de vehículos pesados. Fuente: Irzik, (2010).</i>	<i>20</i>
<i>Figura 8. Detalle sección para carreteras 2+1 con eliminación del carril para vehículos lentos. Fuente: Radimsky, M., (2014).</i>	<i>21</i>
<i>Figura 9. Detalle sección de carreteras 2+1 con eliminación del carril de adelantamiento. Fuente: Gattis, J.L., (2006).</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10. Reequipamiento de carretera de dos carriles a carretera 2+1. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Bak, Kiec, (2015).</i>	<i>22</i>
<i>Figura 11. Comparación del número de pelotones al inicio y al final de la sección 2+1. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Kiec, (2015).</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12. Esquema y fases de la maniobra de adelantamiento según Polus et al., (2006).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 13. Pac probabilidad como una función de la densidad (ρ) para varios valores de p. Fuente: Bentaleb K., (2014).</i>	<i>28</i>
<i>Figura 14. . Probabilidad Pac como una función de la densidad para diversos Pd. Fuente: Bentaleb K., (2014).</i>	<i>29</i>
<i>Figura 15. Carril adicional para circulación rápida. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).</i>	<i>30</i>
<i>Figura 16. Carril adicional para adelantamiento con la zona cebreada reducida. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).</i>	<i>31</i>
<i>Figura 17. Carriles adicionales alternos para adelantamiento. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18. Carriles adicionales alternos para adelantamiento. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19. Esquema de los escenarios de simulación en la dirección principal.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 20. Captura de pantalla del software Aimsun, sección principal y espejo.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21. Captura del software Aimsun. Parámetros correspondientes al experimento.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 22. Captura de pantalla software Aimsun. Parámetro correspondiente al vehículo.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 23. Captura de pantalla software Aimsun. Parámetros de la sección.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 24. Captura software Aimsun. Nodos de generación de tráfico.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 25. Captura software Aimsun. Detector a la entrada de la sección.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 26. Posición inicio y fin adelantamientos en Escenarios 1 y 5.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 27. Porcentaje de adelantamientos según escenarios e intensidades de tráfico.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 28. Porcentaje de vehículos en cola (PF), 0% HV*.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 29. Porcentaje de vehículos en cola (PF), 10% HV.</i>	<i>61</i>

Figura 30. Porcentaje de vehículos en cola (PF), 20% HV.	61
Figura 31. Porcentaje de vehículos en cola de cada escenario respecto al volumen direccional de tráfico.	62
Figura 32. Porcentaje de tiempo cola. Fuente: HCM 2010.	63
Figura 33. Velocidad puntual media temporal a lo largo de la carretera, 0% HV.	65
Figura 34. Velocidad puntual media temporal a lo largo de la carretera, 10% HV.	66
Figura 35. Velocidad puntual media temporal a lo largo de la carretera, 20% HV.	66
Figura 36. Velocidades puntuales detalladas en Escenario 1.	68
Figura 37. Velocidades puntuales detalladas en Escenario 4.	68
Figura 38. ATS (km/h) frente volumen de tráfico (veh/h).	70
Figura 39. Velocidad media de la sección, ATS (km/h).	72
Figura 40. Criterios técnicos para determinar la longitud de zona de adelantamiento óptima en carreteras 2+1.	77
Figura 41. Ubicación del tramo de estudio. CV-405 entre PK 4+000 y PK 13+000. Fuente: Google Maps.	79
Figura 42. Perfil longitudinal del tramo de estudio. Fuente: Google Earth.	80
Figura 43. Condicionantes físicos existentes en la CV-405. Fuente: Google Earth.	81
Figura 44. Acceso urbanización Masía Pavías. Fuente: Google Earth.	82
Figura 45. Accesos a campos. Fuente: Google Earth.	82
Figura 46. Paso superior. Fuente: Google Earth.	83
Figura 47. Acceso urbanizaciones Virgen de Montserrat. Fuente: Google Earth.	83
Figura 48. Conexión CV-405 con CV-415. Fuente: Google Earth.	84
Figura 49. Paso inferior. Fuente: Google Earth.	84
Figura 50. Carril adicional para adelantamiento con la zona cebreada reducida. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).	87
Figura 51. Esquema carretera convencional y solución propuesta.	92
Figura 52. Captura de pantalla software Aimsun. Pendiente de la carretera.	94
Figura 53. Curva cerrada en la CV-405. Fuente: Google Earth.	95
Figura 54. Procedimiento empleado para obtener el radio de la curva más cerrada del tramo.	96
Figura 55. Captura software Aimsun. Velocidades detalladas.	100
Figura 56. Comparativa porcentaje adelantamientos.	104
Figura 57. Comparativa porcentaje de vehículos en cola.	105
Figura 58. Comparativa ATS.	106

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen estadístico del conjunto de datos utilizados para el análisis operativo de tráfico. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Bak, Kiec, (2015).	22
Tabla 2. Resultados operacionales de tráfico en los sitios investigados. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Bak, Kiec, (2015).	23
Tabla 3. Longitud de zonas de adelantamiento por escenarios introducidos en Aimsun. ...	44
Tabla 4. Posición de L_{ZA} y L_{ZNA} .	45
Tabla 5. Valores por defecto de la aceleración máxima.	50
Tabla 6. Valores por defecto de la velocidad deseada.	51
Tabla 7. Valores por defecto del factor de aceptación de la velocidad.	51
Tabla 8. Escenarios simulados en Aimsun para el análisis.	54
Tabla 9. Características de tráfico. Fuente: Análisis de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales, Moreno, A. T., (2015).	80
Tabla 10. Criterios de diseño para establecer longitud óptima de ZA para 1000 veh/h.	86
Tabla 11. Criterios de longitud óptima en base al HCM 2010.	88
Tabla 12. Posiciones exactas secciones 2+1 en la CV-405.	90
Tabla 13. Posiciones de las secciones 1+1 y 2+1 en la CV-405.	91
Tabla 14. Zonas de no-adelantamiento en sentido Torrent-Montserrat.	93
Tabla 15. Zonas de no-adelantamiento sentido Montserrat-Torrent.	94
Tabla 16. Coeficiente de rozamiento transversal máximo movilizado. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado (2016).	96
Tabla 17. Relación Velocidad de Proyecto - Radio mínimo - Peralte máximo. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado (2016).	97
Tabla 18. Velocidades medias obtenidas mediante el modelo propuesto por Pérez Zuriaga, A.	99
Tabla 19. Velocidades límite de la carretera.	99
Tabla 20. Valores de la aceleración máxima.	101
Tabla 21. Valores de la velocidad deseada.	101
Tabla 22. Valores del factor de aceptación de la velocidad.	101
Tabla 23. Valor de los parámetros de visibilidad y distancia de visibilidad según el tipo de carretera.	102
Tabla 24. Características a introducir en los escenarios configurados para el caso práctico.	103

Resumen

Las carreteras 2+1 surgen como alternativa a las vías desdobladas 2+2 para mejorar la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales sin necesidad de construir una segunda calzada. La principal característica de este tipo de carreteras es la presencia de un tercer carril intermedio que permita el adelantamiento en uno u otro sentido de circulación.

Debido a las ventajas que presenta esta tipología de carretera y los pocos estudios desarrollados sobre la funcionalidad de las mismas, surge la oportunidad de llevar a cabo este Trabajo Final de Máster.

El principal objetivo de este Trabajo Final de Máster es el estudio de la funcionalidad en carreteras 2+1 mediante un programa de microsimulación de tráfico, Aimsun, que permite configurar distintas geometrías para diferentes demandas de tráfico. Tras el análisis de los resultados obtenidos, se establecieron una serie de criterios técnicos para determinar la longitud óptima de la zona de adelantamiento en función de las variables operacionales que caracterizan la carretera que se pretenda mejorar.

Posteriormente, se aplicaron dichos criterios a la carretera convencional CV-405, ubicada en la provincia de Valencia. Este tramo de estudio presenta una alta intensidad de tráfico y congestiones, por lo que mejorar la vía mediante secciones 2+1 resultó beneficioso. De este modo, se consiguió mejorar el nivel de servicio disminuyendo el porcentaje de vehículos en cola y aumentando la velocidad media de recorrido.

Por tanto, esta tipología de carreteras aumenta la funcionalidad del tráfico respecto a las carreteras convencionales de dos carriles. Asimismo, las carreteras 2+1 favorecen un aumento de la seguridad vial.

Abstract

2+1 roads come up as an alternative to the 2+2 unfolded ways to improve the functionality of conventional road traffic without building a fourth lane. The main feature of this type of road is the presence of a third intermediate lane that allows the overtaking manoeuvre in either direction of movement.

Because of the advantages of this type of road and the few developed studies on the functionality of them, the opportunity arises to carry out this Final Master Thesis.

The main objective of this Master Thesis is the study of the functionality on 2+1 roads by a traffic microsimulation program, Aimsun, which allows to set different geometries for different traffic demands. After analyzing the results, a number of technical criteria were established to determine the optimal length of the passing lane depending on the operational variables that characterize the road that is intended to improve.

Subsequently, these criteria were applied to conventional CV-405, located in the province of Valencia. This study presents a stretch of high traffic intensity and congestions, so improving the way by sections 2+1 proved beneficial. Thus it was possible to improve the level of service decreasing the percentage of vehicles queuing and increasing the average travel speed.

Therefore, this type of road increases functionality compared to conventional two-lane roads. Also, roads 2+1 increase in road safety.

Resum

Les carreteres 2+1 sorgeixen com a alternativa a les vies desdoblades 2+2 per a millorar la funcionalitat del tràfic en carreteres convencionals sense necessitat de construir un quart carril. La principal característica d'aquest tipus de carreteres es la presència d'un tercer carril intermedi, que permeta l'avançament en un o altre sentit de circulació.

Degut als avantatges que presenta aquesta tipologia de carretera y els pocs estudis desenvolupats sobre la funcionalitat de les mateixes, sorgeix l'oportunitat de dur a terme aquest Treball Final de Màster.

El principal objectiu d'aquest Treball Final de Màster és l'estudi de la funcionalitat en carreteres 2+1 mitjançant un programa de simulació de tràfic, Aimsun, que permet configurar distintes geometries per a diferents demandes de tràfic. Després d'analitzar els resultats obtinguts, s'estableixen una sèrie de criteris tècnics per a determinar la longitud òptima de la zona d'avançament en funció de les variables operacionals que caracteritzen la carretera que es pretén millorar.

Posteriorment, s'apliquen aquests criteris a la carretera convencional CV-405, ubicada en la província de València. Aquest tram d'estudi presenta una alta intensitat de tràfic i congestions, per el que millorar la via mitjançant seccions 2+1 va resultar beneficiós. D'aquesta manera, es va aconseguir millorar el nivell de servici disminuint el percentatge de vehicles en cua, i augmentant la velocitat mitja de recorregut.

Per tant, aquesta tipologia de carreteres augmenta la funcionalitat del tràfic respecte a les carreteres convencionals de dos carrils. Així mateix, les carreteres 2+1 afavoreixen un augment de la seguretat vial.

Introducción

El estado de las infraestructuras de transporte por carretera es fundamental para el desarrollo de un país, tanto social como económicamente. España cuenta con una alta proporción de carreteras convencionales, en las que el flujo de coches en dos sentidos hace que las características operacionales de este tipo de vías sean únicas. En estas vías, los vehículos más rápidos que desean circular a una velocidad mayor, rebasan a los vehículos lentos ocupando el carril opuesto destinado al tráfico en sentido contrario. Cuando es posible realizar la maniobra de adelantamiento, en la que se requiere un nivel de seguridad de la vía y que el usuario cumpla ciertas características, por ejemplo, buena visibilidad, se mejora el nivel de servicio que ofrece la carretera.

Durante los últimos años, España consiguió reducir el número de accidentes anuales en carretera, pero este descenso se ha visto estancado, pues en el año 2014 se redujo en un 1,1% el número de muertos en accidentes de tráfico, nada que ver con años anteriores. Por lo que, se pasó de un séptimo puesto al noveno en una comparativa europea sobre la tasa de mortalidad en carretera. Esto es muy preocupante.

A la vista de la situación que atraviesa la seguridad vial en las infraestructuras de transporte por carretera españolas se proponen una serie de medidas con las que paliar el número de muertes ocasionadas, incluso se persigue el denominado “Objetivo Cero” aprobado por el Parlamento Sueco en 1997, propuesto por la Fundación Mapfre.

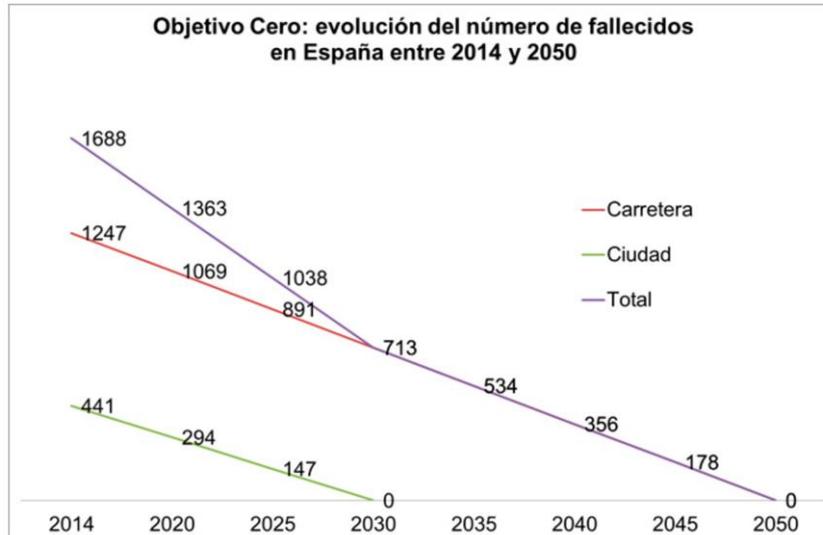


Figura 1. Siniestralidad propuesta según el calendario de Fundación Mapfre. Fuente: Fundación Mapfre.

Esta Fundación contempla también como otro eje principal en la mejora de la seguridad vial el planteamiento del “Sistema Seguro” que implica dos principios fundamentales:

- El sistema vial está compuesto de diversos elementos y, aquí radica la novedad de su planteamiento, en las relaciones entre las diferentes partes.

- Cada uno de los elementos tiene que ser seguro en sí mismo y tiene que ser capaz de, dentro de unos límites razonables, de compensar por los posibles errores en otros elementos.

Los elementos del sistema vial que deben ser seguros son:

- Usuarios seguros.
- Vehículos seguros.
- Vías seguras.
- Velocidades seguras.
- Entornos seguros.

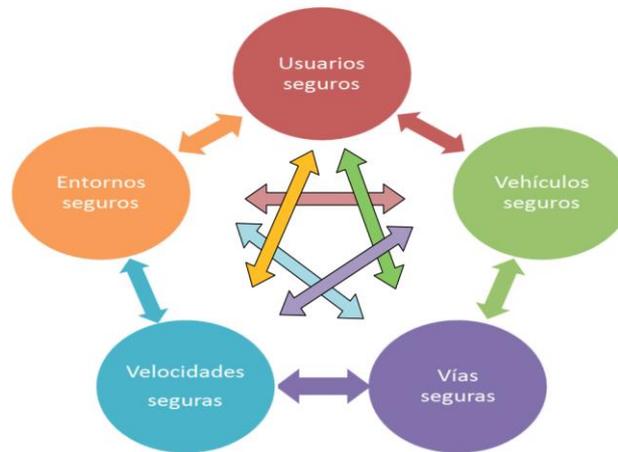


Figura 2. Elementos seguros de un sistema vial. Fuente: Fundación Mapfre.

Se ha estimado que, si las vías convencionales sin desdoblarse (aquellas con un único carril para cada sentido de circulación) fueran igual de seguras que las vías desdobladas (autovías y autopistas), se podrían ahorrar en España todos los años alrededor de 752 vidas. Para conseguir tal seguridad, la única medida propuesta es la configuración de carreteras 2+1.

En este Trabajo Final de Máster el objetivo es estudiar la funcionalidad de tráfico en carreteras 2+1, con el fin de contribuir a la mejora del comportamiento del flujo de vehículos en carretera y, al mismo tiempo, aumentar la seguridad vial gracias a la implantación de esta nueva categoría de vías.

Las carreteras 2+1 se implementan a partir de 1990 en Europa, pioneros de esta filosofía son países de Europa central y del norte, como Suecia, Alemania, Finlandia, Irlanda y Polonia, donde la presencia de las conocidas carreteras 2+1 ya ha sido llevada a cabo. Además, actualmente se han puesto en servicio en Cataluña, donde según cálculos incluidos en el informe elaborado por la Fundación Mapfre en colaboración con la Asociación Española de la Carretera (AEC) su aplicación permitiría salvar la vida de 338 personas al año.

Las carreteras 2+1 están dentro de una categoría específica de carreteras formadas por un total de tres carriles; donde el carril central se habilita como carril de adelantamiento que se emplea alternativamente para cada sentido de circulación. Los dos sentidos de circulación se pueden separar mediante marcas o por aplicación de barreras de seguridad físicas especialmente posicionadas entre los sentidos de circulación.

Estas carreteras se caracterizan principalmente porque la maniobra de adelantamiento se realiza sin vehículos en dirección opuesta, porque están impedidos mediante separación, física o por marcas, entre los dos sentidos de circulación y, además, se integran carriles de adelantamiento aislados a lo largo del segmento.

Los principales objetivos de las carreteras 2+1 son:

- Reducir el riesgo de colisiones frontales.
- Reducir la demora debido a la imposibilidad o limitación de adelantar.
- Mejorar el nivel de servicio.
- Reducir el coste de implantación e impacto ambiental en comparación con el desdoblamiento de la carretera convencional.

En cambio, cabe señalar algunos posibles inconvenientes:

- No son aplicables en obras de paso de gran longitud ni en túneles.
- En los tramos con un solo carril no es posible adelantar a ningún vehículo.
- Mayor recorrido para acceder a las propiedades colindantes, por la imposibilidad o limitación de realizar giros a izquierda.

La reciente configuración de carreteras hace que sea objeto de estudio en diversos campos, con el propósito de encontrar los parámetros más importantes para el diseño geométrico de las mismas.

Para estudiar la funcionalidad en carreteras, es una práctica muy eficaz el empleo de programas de microsimulación de flujo de vehículos; mediante estos programas es posible observar y analizar el comportamiento de los vehículos individuales y simular el tráfico en su conjunto a través de la interacción de éstos en el trazado creado en el modelo.

En el empleo de programas informáticos de microsimulación es muy importante la calibración del modelo para la evaluación de las diferentes variables que afectan al comportamiento de los conductores y para la identificación de parámetros legislativos y geométricos significativos de la carretera. Con la calibración del modelo, es posible solventar las deficiencias de los programas utilizados, pues es muy complejo que la microsimulación ofrezca un comportamiento exactamente igual al que presenta el tráfico en la realidad. Por lo que, la componente ficticia del proceso se pretende minimizar gracias a la calibración y validación del modelo, manipulando las variables a ajustar.

Este Trabajo de Final de Máster surge de la oportunidad de avanzar en el conocimiento de la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1 mediante microsimulación del tráfico.

El desarrollo del mismo incluye la creación del modelo a simular en el programa informático Aimsun, facilitado por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras de la Universidad Politécnica de Valencia, así como el análisis de los datos obtenidos de las simulaciones y continuar con la definición de criterios de diseño para carreteras 2+1, que se deducen a raíz del análisis de resultados previo. El fin es aplicar lo deducido a un caso de carretera convencional de la red de carreteras de la Comunidad Valenciana, la CV-405, sobre la que estudiar la funcionalidad de tráfico de su estado actual y una solución en la que se considere la incorporación de secciones 2+1.

Estado del arte

En este apartado se presenta la revisión y recopilación de los conocimientos existentes sobre las carreteras 2+1. Constituye el punto de partida y base teórica a cualquier estudio científico a realizar.

Se recogerán los documentos existentes hasta la fecha en el ámbito de estudios realizados sobre carreteras 2+1, maniobra de adelantamiento, carriles de adelantamiento, microsimulación, así como presentar las limitaciones del conocimiento actual sobre el tema a estudiar

En primer lugar, se analizan los documentos y estudios sobre carreteras 2+1, a partir de los cuales se definen los parámetros a considerar para el diseño de las mismas. En este apartado también se considera la señalización empleada para esta configuración y comparar con el costo que supone en carreteras convencionales.

A continuación, en segundo lugar, se recogen aquellos estudios que han considerado como objeto la maniobra de adelantamiento, fundamental para considerar el nivel de servicio de una carretera. Para el caso que nos atañe en este trabajo, además es de relevancia porque en función de los adelantamientos se fundamenta el comportamiento del vehículo en las vías 2+1.

En tercer lugar, se detalla información recopilada sobre los carriles de adelantamiento, donde tienen lugar los adelantamientos comentados anteriormente y principal objeto de estudio en las carreteras 2+1, este elemento es el que otorga la peculiaridad a estas novedosas vías.

El cuarto lugar, está dedicado a la microsimulación y el programa informático que se va a aplicar en este estudio. Se analizarán aspectos como el modelo para carreteras convencionales que posteriormente se modificará para adaptarlo a las carreteras 2+1.

En quinto y último lugar, se comentan las limitaciones del conocimiento actuales, puesto que se trata de un tema de reciente aparición, instalado en contados países y que está siendo de interés para otros, especialmente el caso de España. Este último punto, en particular, se basa en exponer las limitaciones y dudas respecto a las investigaciones y normativas actuales, que suponen la ventana de oportunidad para las cuestiones a investigar.

Carreteras 2+1

Durante los últimos años unos de los temas más estudiados están relacionados con la mejora de funcionalidad de tráfico y aumento de la seguridad vial.

Debido al aumento de los volúmenes de tráfico en muchas zonas, rurales o urbanas, la demanda de tráfico de la red de carreteras también ha incrementado. Los volúmenes de tráfico en carreteras de doble sentido y un carril por cada uno de ellos también han aumentado, lo que provoca congestión del tráfico repercutiendo, a su vez, en la capacidad de las carreteras.

Los vehículos pesados agravan el problema pues los conductores que desean circular a mayor velocidad rebasan al vehículo más lento en situaciones en las que el adelantamiento se produce con poca distancia de visibilidad, es decir, en condiciones peligrosas. Esto podría solucionarse con la implantación de carreteras 2+1; que proporcionan determinados beneficios de las carreteras de cuatro carriles, pero con menor coste.

La sección de una carretera 2+1 viene representada en la Figura 3 donde la configuración se iría repitiendo alternativa y consecutivamente a lo largo de la longitud del tramo considerado.

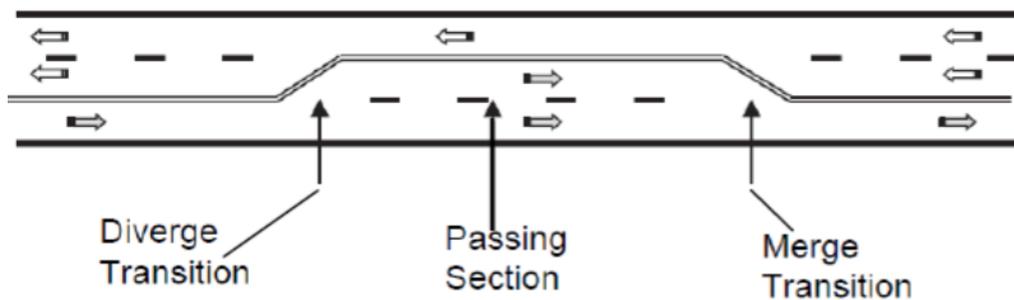


Figura 3. Detalle sección tipo carretera 2+1. Fuente: Brewer, Venglar, (2010).

Los estudios que se han encontrado y van a ser comentados son:

- Estudio realizado por Bergh, T. Y Carlsson, A., (2000), a petición de la Swedish National Road Administration.
- Estudio realizado por Ray B. Derr, (2003).
- Estudio realizado por Bewer, M., (2003).
- Investigación realizada por JL Gattis, (2006).
- Estudio realizado por Lee, S. K., Kim, Y. R., Moon, J. P., Choi J. S., (2010).
- Estudio realizado por Irzik M., (2010).
- Estudio realizado por los autores Brewer y Venglar, (2010).
- Estudio de Park B., Fitzpatrick K. y Brewer, M., (2012).
- Estudio llevado a cabo por Radimsky, M., (2014).

- Trabajo “Investigating the influence on safety and traffic performance of 2+1 road sections in Poland”, Cafiso, S., D’Agostino, C., y Kiec, M., (2015).
- Trabajo Final de Master “Análisis de la funcionalidad de una carretera 2+1 mediante microsimulación”, Monterosso, L., (2015).

A continuación, se comenta la información recopilada en los estudios señalados anteriormente conforme su fecha de publicación, para contemplar los avances progresivamente.

El estudio realizado por Bergh, T. Y Carlsson, A., (2000), a petición de la Swedish National Road Administration resulta de gran interés. Está basado en la red de carreteras de Suecia y su objetivo es analizar la evolución de una carretera que ha pasado de tener un único carril por sentido a ser de configuración 2+1 desde el punto de vista de la seguridad y la velocidad. La separación entre los carriles se efectúa mediante barreras formadas por un cable o mediante marcas viales, además, busca encontrar un diseño que reduzca los accidentes de tráfico en un 20-50%.

Un aspecto que los autores aseguran es que el paso de una carretera convencional a una carretera 2+1 resulta hasta 3 veces más económico que la configuración 2+2.

En su estudio se realizaron observaciones durante un año y medio. En los primeros tramos de las carreteras transformadas y se observó una drástica reducción de accidentes debida a la creación de carreteras 2+1. Se pasó de 21 accidentes mortales en 10 años a ninguno durante el año y medio de periodo de observación. Las velocidades también se vieron aumentadas, el 1% de los vehículos circulaban a una velocidad inferior a 75 km/h.

Derr, R. B., (2003) realiza un estudio en el que se examinan en detalle las características de las carreteras 2+1 construidas en los países europeos de Alemania, Finlandia y Suecia, este estudio busca encontrar directrices para la aplicación de estas carreteras en Estados Unidos. Se analizaron las características geométricas, de señalización, seguridad y características operativas del tráfico en cada país. Los datos obtenidos se analizaron, se compararon las características de tráfico europeo con sus correspondientes estadounidenses. Se llegó a la conclusión de que el uso de la carretera 2+1 en el caso de volúmenes medios o altos de tráfico aumentaría el nivel de servicio en comparación con el uso de una carretera convencional con un carril en cada dirección. Lo mismo se hizo para la reducción de accidentes, se consiguieron reducir en un 24% después de implantar las carreteras 2+1.

En el mismo año, 2003, el autor Brewer, M., lleva a cabo un estudio en el que define algunas recomendaciones para la señalización de las carreteras 2+1. Las recomendaciones son las siguientes:

- Localizar con antelación señales de aviso que indiquen la presencia de los nuevos carriles antes de que lleguen. Para advertir al conductor de su presencia a dos millas.
- Colocar una señal que indique que el carril izquierdo es solamente de adelantamiento.

- Señal cuando vaya a finalizar el tramo de adelantamiento.
- Finalizado el carril de adelantamiento, disponer de otra señal que indique la distancia hasta el próximo tramo de adelantamiento.

La investigación de JL Gattis en el año 2006 consiste en estudiar la longitud del tramo de adelantamiento en carreteras 2+1. Primero estudia aspectos como la densidad de tráfico, longitud de los carriles velocidad y maniobras de adelantamiento y llegó a conclusiones como:

- Un volumen de tráfico alto, justifica una longitud extra de los carriles de adelantamiento.
- Para volúmenes bajos, las carreteras 2+1 proporcionan un beneficio realmente bajo y más si el terreno es llano y con una alineación recta. El sistema aporta beneficios para terrenos accidentados y sinuosos.
- Sería interesante determinar si la disminución de densidad contribuye a la disminución de la tasa de accidentes en las secciones de aumento y disminución del carril. Si dicha premisa se demostrase habría que considerar entonces las longitudes de los carriles de adelantamiento, teniendo en cuenta los condicionantes externos que limitan dichas longitudes como puedan ser pendientes, puentes estrechos, cruce de caminos, etc.

Otro estudio interesante ha sido realizado por Lee, S. K., Kim, Y. R., Moon, J.P., Choi, J. S., publicado en 2010. El objetivo de este estudio conocido como “*Operational Analysis of 2+1 Roadway and its Use in Developing Geometric Design Standards in S Korea*” es analizar las características de las carreteras 2+1 en los países europeos para encontrar una configuración óptima internacional, así como estudiar, las ventajas en términos de funcionamiento y de la seguridad de estas carreteras. En la siguiente tabla se representan las características de las carreteras 2+1 en los diferentes países de Europa.

Category			Sweden	Germany	Finland	Denmark	Scotland	Ireland
Speed Limit(km/h)			90~100	100	-	80~90	Rural: 85~120, Urban: 30~80	
AADT			4,000~20,000	15,000~25,000	14,000	7,000~14,000	9,800	11,600~17,250
Passing Lane Length(km)			1.0~2.5	1.0~1.4	1.5	1.55	-	1.0~2.0
Lane width(m)	2-lane	1	3.25	3.25	3.25	3.25	3.5	3.5
		2	3.25	3.25~3.5	3.5	3.25	3.5	3.5
	1-lane		3.75	3.5~4.25	3.75	3.5	3.5	3.5
Shoulder width(m)			1.0	0.25	1.25	1.0	1.0	0.5~1.0
Critical transition area length(m)			300	180	500	300	500	300
Non-Critical transition area length(m)			100	≥ 30	50	-	-	50
Median type			Guard Cable	Lane Marking	Planning	Lane Marking	Lane Marking	Guard Cable

Figura 4. Diseño geométrico de carreteras 2+1 en Países Europeos. Fuente: Lee, Kim y Moon, (2010)

Para la realización de esta investigación se emplearon datos reales relacionados con la velocidad, el volumen de tráfico y el tamaño de los pelotones de vehículos, obtenidos mediante la colocación de cámaras de video al principio y fin del carril de adelantamiento. Se muestra en la Figura 5:

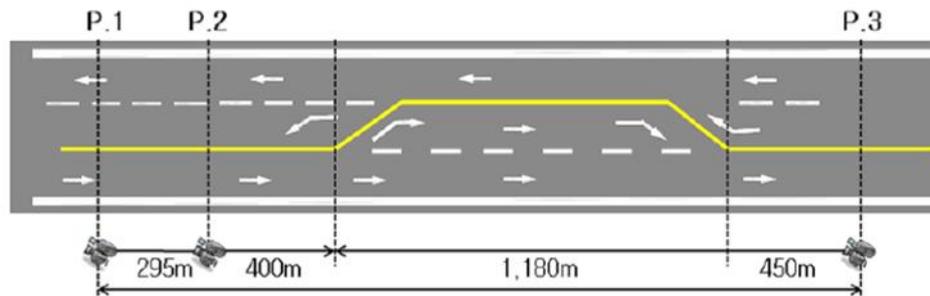


Figura 5. Disposición de cámaras de adelantamiento. Fuente: Lee, Kim y Moon, (2010).

Para este estudio se define pelotón como el conjunto de vehículos cuya distancia en términos de tiempo entre un vehículo lento delante de uno rápido es inferior a 3 segundos, igual que establece el Manual de Capacidad (HCM 2010).

Se consideran dos posibles formas de construir el carril de adelantamiento, dependiendo de si la administración quiere transformar la 2+1 en una carretera de cuatro carriles en un momento dado. Las recomendaciones sobre la geometría requieren de una longitud mínima de la “diverging area” de 90 m, mientras que la “merging area” tiene que ser de aproximadamente 280 m como mínimo. Las medidas propuestas se contemplan en la imagen siguiente:

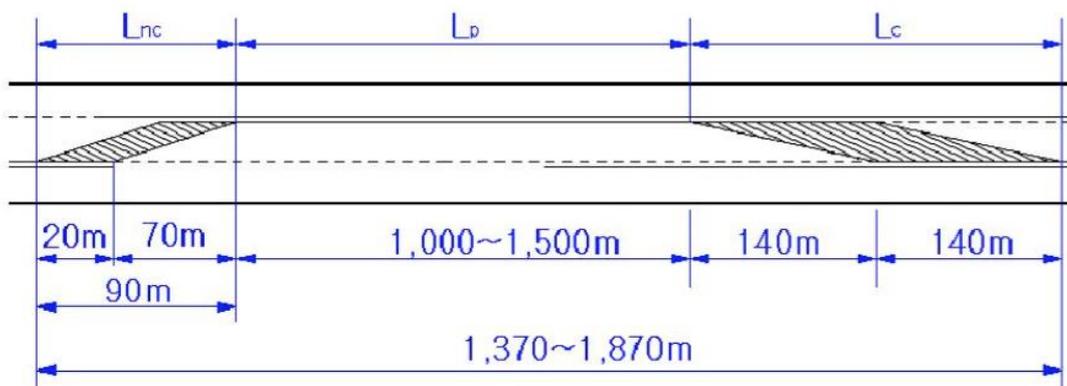


Figura 6. Configuración de la zona de transición para carretera 2+1. Fuente: Lee, Kim, Moon, (2010).

El estudio concluye que las estimaciones operacionales han demostrado que la velocidad media de una carretera convencional después de transformarla a una carretera 2+1 aumenta hasta unos 19 km/h y se elimina un 10% de la demora. En cuanto al efecto sobre la seguridad, se ha estimado que se produce una importante reducción de los accidentes.

Otra aportación importante al tema de las carreteras 2+1 es la llevada a cabo en 2010 por Irzik M., quien estudia cómo encontrar la longitud ideal para el carril de adelantamiento en este tipo de carreteras. Se tienen en cuenta tanto el porcentaje de vehículos pesados en el interior del flujo de vehículos, como los efectos sobre la seguridad en el carril con sentido contrario resultantes de la longitud demasiado alta del carril rápido examinado. El estudio también proporciona una longitud mínima para esta parte de la vía a partir de consideraciones sobre la seguridad general de la carretera.

La investigación no sólo se basa en el análisis de la literatura, sino también analiza los datos empíricos, pero sólo en las carreteras 2+1 alemanas con las siguientes características:

- Afectadas sólo por vehículos motorizados.
- Límite de velocidad de 100 km/h.
- Juntas separadas.
- Ligeras pendientes, no más del 2%.
- Curvaturas reducidas.

Las carreteras elegidas entre aquellas que cumplen los requisitos han sido 15, con un rango de longitudes para el carril de adelantamiento de 800-1700 metros y un rango de volumen de tráfico de 400-1300 vehículos/h. El estudio entonces se podrá aplicar sólo a las carreteras con parámetros dentro de estos intervalos y con las características anteriormente mencionadas.

Las variables consideradas son:

- Volumen de tráfico.
- Posición de la vía de adelantamiento.
- Porcentaje de vehículos pesados.
- Porcentaje de pelotones no resuelto.

El resultado de este estudio es un método bastante sencillo para determinar la longitud óptima para el carril de adelantamiento en las carreteras 2+1. La Figura 7 muestra un ejemplo de cómo determinar la longitud buscada por una carretera conociendo el volumen de tráfico y el porcentaje de vehículos pesados.

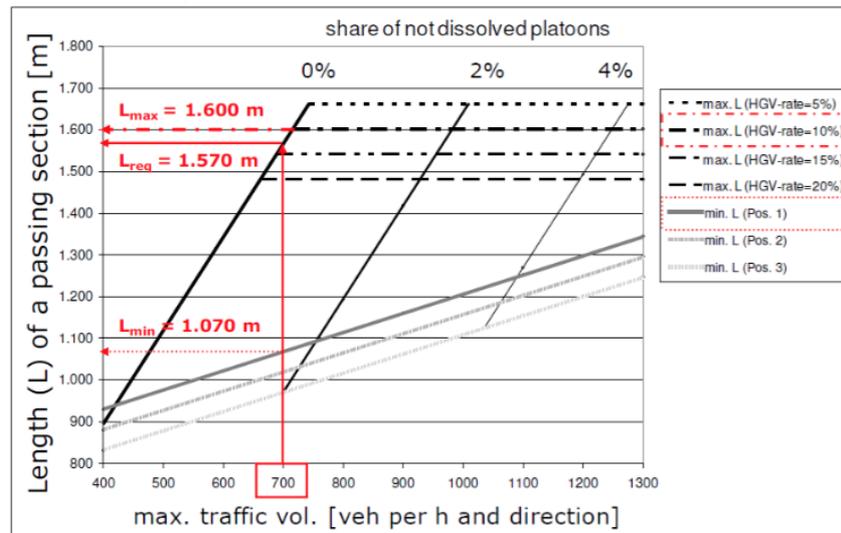


Figura 7. Gráfico para determinar la longitud de la vía de adelantamiento para una carretera con cierto volumen de tráfico y un porcentaje de vehículos pesados. Fuente: Irzik, (2010).

Los autores Brewer y Venglar en el año 2010 realizaron un estudio de campo en las carreteras Super 2 de Texas (carreteras 2+1); llegaron a la conclusión que las carreteras 2+1 mejoran el tráfico respecto a las carreteras convencionales de dos carriles, además se observó que los vehículos preferían el carril a la entrada de la nueva sección realizando las maniobras de adelantamiento al comienzo de la misma, no obstante muchos de ellos sin embargo se situaban en este carril sin realizar las maniobras de adelantamiento.

Aproximadamente el 92% de los vehículos circulantes por el carril izquierdo comenzó la maniobra en el inicio de la sección, en el caso de los camiones grandes tendían a usar el carril de la derecha de manera que permitían el paso de los vehículos más rápidos. Aproximadamente el 74% de los camiones circulaba por el carril derecho. La utilización del carril de la derecha por a la salida fue más baja que en la entrada, aunque seguía siendo alta en general, estando sus valores entre el 67 y el 91% según la carretera.

Dos años después, los autores Park B., Fitzpatrick K. y Brewer, M. en su estudio de 2012, estudian la eficacia en la seguridad en las carreteras Super 2 de Texas. Comentan varios estudios con el fin de establecer una comparación entre sus resultados y los obtenidos en las carreteras Super 2, entre ellos citan los realizados por Bayes mediante el método empírico.

Como conclusión del estudio, se afirma que los carriles de adelantamiento condujeron a una reducción del 35% de los accidentes en los tramos y del 42% en las intersecciones. Dichos datos coinciden con los obtenidos en las Super 2. Sin embargo, los autores recomiendan que en un futuro se obtengan conclusiones definitivas sobre los accidentes porque el análisis realizado podría no ser suficiente.

En el año 2014, Radimsky, M., realizó un estudio en el cual se analizan los efectos de la seguridad de la influencia de la longitud de la sección de adelantamiento, además

estudió cómo podría variar la seguridad en función de los dos tipos de reducción de carril existente en carreteras 2+1.

El resultado de la investigación fue que con un aumento de la longitud del carril de adelantamiento en carreteras 2+1, la tasa de accidentes en la sección de reducción del carril disminuye. Además, añade a las conclusiones otras observaciones como que hay que garantizar que la sección de reducción de carriles se encuentre en una zona con suficiente distancia de visibilidad. Para ello se plantean dos posibles escenarios.

La primera opción aportada es la reducción del carril para vehículos lentos:



Figura 8. Detalle sección para carreteras 2+1 con eliminación del carril para vehículos lentos. Fuente: Radimsky, M., (2014).

Esta forma plantea problemas de seguridad para los vehículos lentos porque éstos se tienen que incorporar a un carril donde los vehículos circulan a velocidades más altas. Además, a pesar de los pocos datos registrados por los autores en estas secciones, estos muestran que a priori la sección con reducción de carril para vehículos lentos es más insegura que la reducción del carril de adelantamiento.

La segunda opción presenta la siguiente morfología, Figura 9, consiste en reducir el carril de adelantamiento:

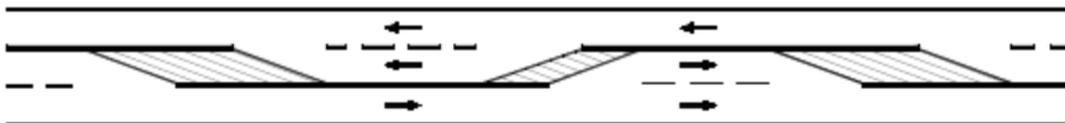


Figura 9. Detalle sección de carreteras 2+1 con eliminación del carril de adelantamiento. Fuente: Gattis, J.L., (2006).

Aparentemente esta sección parece ser más segura que la primera opción presentada. Asimismo, en el estudio se observa un aumento de la velocidad en las secciones con carriles de adelantamiento y un aumento del volumen de tráfico.

El trabajo de “*Investigating the influence on safety and traffic performance of 2+1 road sections in Poland*” de Cafiso, S., D’Agostino, C., y Kiec, M., en 2015 presenta los resultados de las observaciones de campo sobre las características operativas de las carreteras 2+1 con secciones cortas en Polonia.

Los análisis se realizaron sobre una red de carreteras de dos carriles, con longitud total de unos 353 kilómetros, donde se han introducido secciones de 2+1 desde el año 2009. Se identificaron 16 secciones de 2+1, por un total de 12,9 km, para el estudio empírico Antes-Después (A/D). Estas secciones fueron adaptadas en 2009 de carreteras de dos

carriles, uno para cada sentido, con arcenes pavimentados a carreteras 2+1, como se muestra en la Figura 10 siguiente. Todas las secciones se encuentran en zonas rurales.

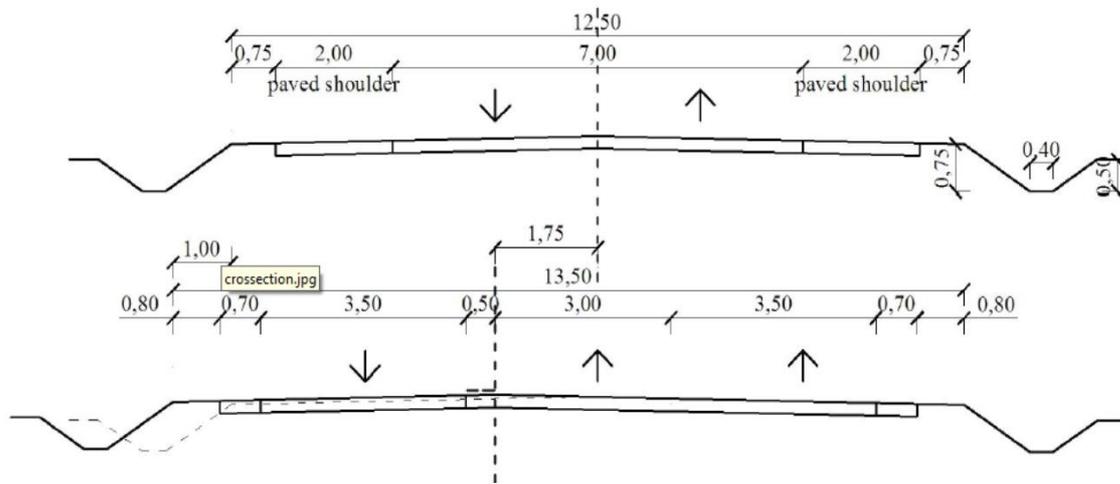


Figura 10. Reequipamiento de carretera de dos carriles a carretera 2+1. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Bak, Kiec, (2015).

Los análisis operativos del tráfico se realizaron mediante observaciones de campo en cinco sitios de prueba seleccionados en las 16 secciones de 2+1 citadas antes. Para esta fase se utilizan de neumáticos sensores de tráfico y cámaras ANPR para obtener datos de volumen de tráfico, clasificación de vehículos y velocidad.

Site	Length of the passing lane [m]	Traffic volume [veh./lane/hour]			Percentage of heavy vehicles [%]			Average speed of traffic flow [km/h]	
		Min	Max	Av	Min	Max	Av	upstream	downstream
1	800	625	714	667	15.3	15.7	15.5	49.8	69.4
2	700	747	841	787	12.9	16.7	14.4	65.6	76.5
2	1000	553	577	621	16.1	21.1	18.7	74.5	78.7
4	600	499	863	624	16.8	20.4	19.1	62.3	75.4
5	550	417	552	504	16.5	22.6	20.5	83.3	89.3

Tabla 1. Resumen estadístico del conjunto de datos utilizados para el análisis operativo de tráfico. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Bak, Kiec, (2015).

La AADT para estas secciones, con longitud desde 550 m hasta 1000 m, fue casi de 18.000 vehículos/día. Las observaciones de campo se tomaron bajo en buenas condiciones meteorológicas durante un mínimo de 4-5 horas. El volumen de tráfico estuvo en el intervalo de 417-863 veh/carril/hora. Todas las secciones se encuentran en terreno llano con pendiente inferior al 3%.

El estudio de campo contempla el comportamiento del conductor y las operaciones de tráfico al inicio y al final de las secciones de 2+1, volumen de tráfico, clasificación de los vehículos y velocidad en cada carril de adelantamiento. Los datos se han utilizado para evaluar los cambios en formación de pelotones y velocidad.

Basándose en los datos obtenidos, se calcularon las siguientes variables: velocidad local, velocidad de marcha en el carril de adelantamiento, el porcentaje promedio de los

vehículos en pelotón, tamaños de pelotones y el porcentaje de vehículos pesados. En este estudio, un pelotón se compone de vehículos en movimiento con distancia asumida entre ellos menores de 3 segundos. Los objetivos del estudio son cuantificar las siguientes variables en presencia del carril de adelantamiento de la 2+1:

- Porcentaje de reducción de los pelotones.
- Diferencia en la velocidad con el carril de adelantamiento.
- Porcentaje de vehículos que adelantan.
- Cambios de tamaño de los pelotones.

Site	Length of passing lane [m]	Average vehicle speed [km/h]		Average passing rates [%]	Average platoon reduction [%]	Size of platoon [veh./platoon]	
		passing lane	right lane			upstream	Downstream
1	800	83.3	63.9	39.9	19.6	3.86	3.49
2	700	87.6	68.9	31.6	10.9	2.98	3.23
2	1000	82.7	67.1	52.2	4.2	3.56	3.49
4	600	83.3	66.3	43.3	13.1	3.20	3.37
5	550	95.0	76.3	16.8	6.0	3.01	3.07

Tabla 2. Resultados operacionales de tráfico en los sitios investigados. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Bak, Kiec, (2015).

Debido a la presencia de secciones cortas con carril de adelantamiento en los tramos analizados, se prestó especial atención a la eficiencia de la descarga de pelotones de tráfico. En el estudio se estimó la variabilidad del tamaño de pelotones al principio y al final de la sección para diferentes valores de volumen de tráfico.

Los datos mostraron que con el aumento en el volumen de tráfico se produce un aumento en los pelotones. Reducción en los pelotones, entre el principio y al fin del carril de adelantamiento, se mantiene constante con un valor promedio de 6,6%, independientemente del volumen de tráfico. Esta reducción de los pelotones es inferior a la aportada en otros estudios. Esta diferencia puede deberse a un alto porcentaje de vehículos pesados, lo que afecta significativamente las características de la formación de colas. Un aumento del 1% de vehículos pesados repercute en una reducción del porcentaje de vehículos en cola del 0,5%.

Por otra parte, el impacto de la longitud del carril de adelantamiento es significativo en la reducción del tamaño de los pelotones. El análisis de la reducción media de pelotones, para un volumen de tráfico entre de 552-625 veh/h en cada sitio de prueba, depende de la longitud del carril de adelantamiento: con longitudes de 550-600 m, se obtiene una reducción de pelotones con valor del 5,5%, mientras que, para tramos más largos del carril de adelantamiento la reducción media de los pelotones fue del 10,2%.

Además, se analizó la variabilidad entre la velocidad de los vehículos que circulaban por secciones 2+1 y la velocidad local al comienzo y al final de cada sección. El análisis mostró que los vehículos que transcurrían por el carril de adelantamiento, llevaban una velocidad promedio de viaje superior en un 17,9 km/h en comparación a los vehículos que utilizan el carril de la derecha. Esto afecta en la dispersión de velocidad en el tráfico. La diferencia en la velocidad media antes y después del carril de adelantamiento es

aproximadamente igual a 10,5 km/h con una velocidad media de 68 km/h al comienzo de la sección. El valor de velocidad está condicionado por la presencia de vehículos pesados para los que el límite de velocidad es de 70 km/h.

También se observó la influencia del número de adelantamientos en función de la longitud del carril de adelantamiento. Se registró un alto porcentaje de vehículos que adelantan en las secciones más largas (31,6%-52,2%), en comparación con las secciones más cortas, de longitud del carril de adelantamiento de 550 m (16,8%). A pesar del porcentaje de los vehículos que realizan el adelantamiento, se ha obtenido una baja reducción de los pelotones. El cambio de tamaño de los pelotones al principio y al final del carril de adelantamiento es ambiguo. Sin embargo, el número de pelotones disminuye en todos los sitios de medición al final de la sección. Esto se observa en la Figura 11.

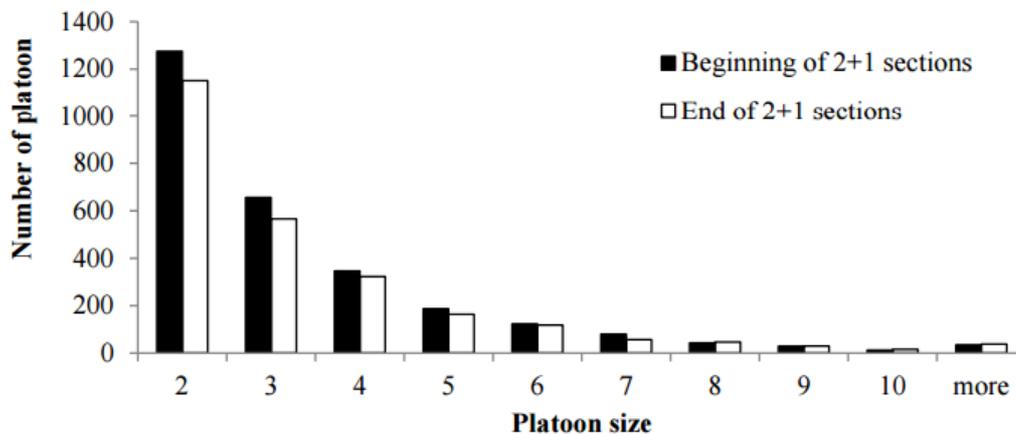


Figura 11. Comparación del número de pelotones al inicio y al final de la sección 2+1. Fuente: Cafiso, D'Agostino, Kiec, (2015).

En resumen, el artículo concluye con diversas consideraciones. Las secciones ampliadas en las carreteras de Polonia no cumplen estrictamente con una sección 2+1 debido a limitaciones territoriales. Esto, sumado a la falta de investigaciones en seguridad vial y operatividad del tráfico motiva esta investigación. Señala la importancia en la fase de diseño para las zonas de transición, especialmente en el diseño de las transiciones críticas.

Desde el punto de vista operacional se observa el impacto del volumen de tráfico y la dispersión de la velocidad en secciones 2+1. Sin embargo, los resultados en la formación de vehículos en cola no hay mejoras significativas gracias a las secciones de adelantamiento. Por lo que, las expectativas operacionales han resultado estar por debajo de lo esperado.

Por último, el trabajo de investigación de “Análisis de la funcionalidad de una carretera 2+1 mediante microsimulación” realizado por Monterosso, L., 2015. El objetivo que presenta es mejorar la seguridad vial de una red vial a través de la introducción de configuraciones innovadoras de carreteras. Esto implica la creación de un modelo de microsimulación que reproduzca fielmente el comportamiento de carreteras 2+1, con el fin de conocer los parámetros que influyen en el funcionamiento de las carreteras 2+1

en la simulación, y finalmente, analizar los adelantamientos producidos en la sección de 2+1 dentro de la simulación.

Este estudio concluye con los siguientes puntos fuertes:

- Programas de microsimulación como mejor herramienta para estudiar la funcionalidad en carreteras 2+1.
- El sello distintivo de estas vías es la maniobra de adelantamiento.
- Importancia de la identificación de aquellos parámetros del programa que influyan en el comportamiento de los conductores.
- El volumen de tráfico no afecta al porcentaje de adelantamientos, pero sí al rendimiento de la carretera, aumentando el tiempo de demora cuanto más corto sea el carril de adelantamiento.

Para conseguir un comportamiento fiel de los conductores en la vía implementada y lograr resultados plausibles y cercanos a los reales se han de considerar como parámetros importantes la distancia de visibilidad, el margen de seguridad para el adelantamiento y la longitud del carril de adelantamiento.

De la aplicación realizada indica que la cantidad de tráfico no afecta al porcentaje de adelantamientos, mencionado antes, para iguales flujos en cada tramo, se obtienen siempre los mismos porcentajes de adelantamiento para longitudes de 550, 600, 700, 800 y 1000 m.

Maniobra de adelantamiento

Para la recopilación de información sobre la maniobra de adelantamiento se han consultado los estudios:

- *“Análisis del adelantamiento en carreteras convencionales y propuesta de modelos para la mejora del diseño y de la señalización de las mismas”* por Llorca, C., (2015).
- Khalid Bentaleb, et al. en el año 2014.

En primer lugar, la investigación de Llorca, C., (2015) define que, en la maniobra de adelantamiento, un vehículo pasa delante de otro que circula a menor velocidad.

Se tiene que distinguir entre adelantamientos en vías con un solo carril por sentido y los ocurridos en vías con más de un carril para cada sentido de circulación. En cada caso, su efecto sobre el tráfico es el de reducir las interferencias entre vehículos que circulan a distintas velocidades y permitir a un mayor número de ellos de circular libremente. Así se mejora la calidad de la circulación.

El adelantamiento es una maniobra muy compleja, en la que se distinguen varias etapas, del momento en que el conductor del vehículo más rápido decide acercarse a lo más lento a que se termina la maniobra.

El vehículo lento recibe el nombre de vehículo adelantado, el vehículo rápido se denomina vehículo seguidor y, después, adelantante.

De acuerdo con este estudio se pueden distinguir las siguientes tres etapas: deseo de adelantar, decisión de efectuar la maniobra y su ejecución.

Como primera etapa se considera el deseo de adelantar del conductor del vehículo más rápido dependiente de la diferencia entre su velocidad deseada y la velocidad del vehículo enfrente de él.

Después del deseo, estará la decisión de adelantar que consiste en la aceptación o rechazo de huecos en el sentido contrario. En una carretera convencional, con un carril por sentido, un hueco es el intervalo de tiempo o la distancia entre dos vehículos que circulan en el sentido opuesto.

El conductor del vehículo seguidor decide aceptar o rechazar los huecos en función de su tamaño y de su estimación de distancia de adelantamiento necesaria.

Aceptado el hueco, el vehículo detrás inicia la maniobra invadiendo el carril opuesto y acelerando, si es necesario.

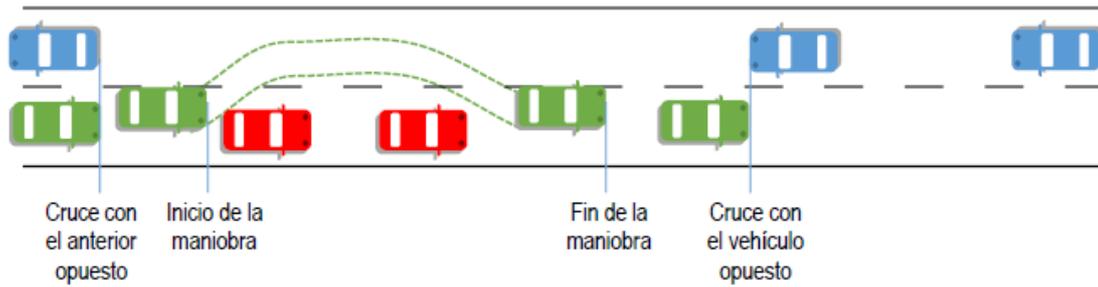


Figura 12. Esquema y fases de la maniobra de adelantamiento según Polus et al., (2006).

Si durante la maniobra de adelantamiento el conductor del vehículo adelantante observa alguna dificultad para concluir el adelantamiento reacciona y puede optar por abortar el adelantamiento, regresando al carril propio detrás del vehículo que pretendía adelantar. A partir de cierto punto, llamado posición crítica, resulta ser más seguro y rápido completar la maniobra que abortarla.

Muchos son los factores que tienen una influencia en la maniobra de adelantamiento:

- Factores dependientes de las características y condiciones de la vía.
- Factores relacionados con el tráfico (volumen, composición y velocidad de operación).
- Factores relacionados con el conductor.
- Factores del entorno, condiciones de luminosidad (diurna y nocturna).
- Condiciones meteorológicas.

La maniobra de adelantamiento tiene como finalidad reducir las interferencias entre vehículos que circulan a velocidades diferentes a lo largo de una carretera, esto es por la variabilidad en velocidades de circulación que origina la necesidad o demanda de adelantamientos.

Por lo tanto, el adelantamiento tiene un importante efecto en las condiciones del tráfico y en aquellos tramos donde exista la oportunidad de adelantamiento la calidad de la circulación será mayor que en aquellos donde la demanda de adelantamientos no pueda ser satisfecha y se ocasionen demoras a los conductores de los vehículos más rápidos.

La calidad de la circulación en un determinado elemento de la infraestructura viaria se caracteriza, principalmente, mediante el concepto de nivel de servicio existente en el Manual de Capacidad (HCM 2010). En el caso de carreteras de calzada única, el nivel de servicio se calcula considerando la velocidad media y el porcentaje de tiempo en cola. Un vehículo está en cola si tiene que mantenerse detrás de otro más lento. El porcentaje de tiempo en cola se estima a partir de la intensidad de tráfico, su reparto en sentidos, y la proporción de tramos con prohibición de adelantamiento.

Último parámetro a tener en cuenta es la distancia de visibilidad de adelantamiento, que se define como la distancia de visibilidad necesaria para que un vehículo pueda adelantar a otro en presencia de un tercero que se acerca en sentido opuesto.

Para adelantar es necesario disponer de una distancia libre de obstáculos mayor a la que el vehículo adelantante recorre mientras se realiza el adelantamiento.

La distancia de visibilidad necesaria se compone de la distancia recorrida por el vehículo adelantante al efectuar la maniobra, más la recorrida por un vehículo en el sentido opuesto durante el mismo tiempo. Además, se suele añadir a estas un margen de seguridad o hueco residual crítico.

La distancia de visibilidad de adelantamiento es, entonces, la distancia que el conductor del vehículo adelantante debe ser capaz de observar a lo largo del carril opuesto. Al observar esta distancia libre de vehículos en sentido contrario, es posible llevar a cabo la maniobra de forma segura.

A continuación, se menciona el estudio realizado por Khalid Bentaleb et al. (2014), para comprender mejor el fenómeno del adelantamiento y la seguridad que precisa.

En este estudio se investiga la probabilidad de sufrir accidentes de tráfico a través del modelo de CA de Nagel y Schreckenberg para carreteras de un solo carril, en el caso de tráfico mixto de vehículos lentos y rápidos teniendo en cuenta también la posibilidad de adelantamiento de los vehículos rápidos.

La probabilidad de sufrir accidentes resulta ser función de la densidad del flujo de tráfico: hay una densidad crítica de debajo de la cual no hay accidentes, por encima de este valor con el aumento de la densidad también crecen las posibilidades de sufrir accidentes, que alcanza un máximo y luego disminuye con un aumento adicional de la densidad.

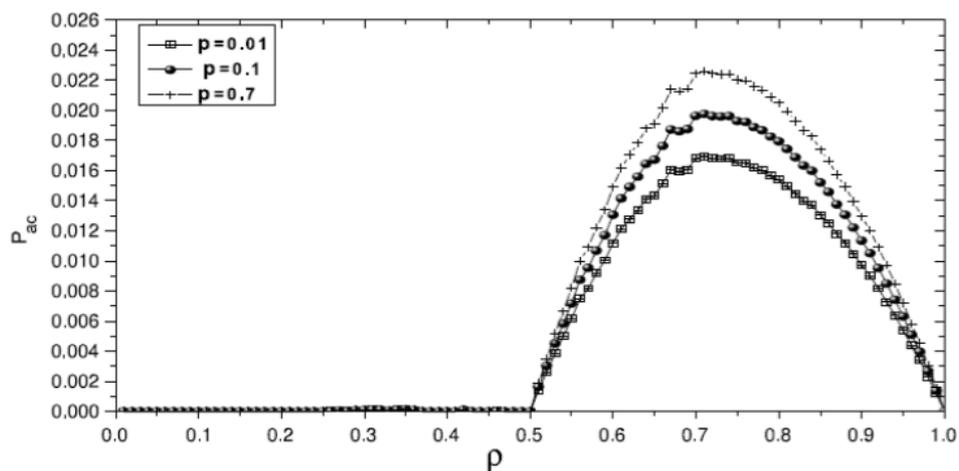


Figura 13. P_{acc} probabilidad como una función de la densidad (ρ) para varios valores de p . Fuente: Bentaleb K., (2014).

El estudio muestra como los accidentes también pueden ocurrir en condiciones de fluidez. Cuando la densidad es baja, la velocidad es alta y los vehículos rápidos superan a los lentos sin problemas. Adelantamientos arriesgados podrían fácilmente causar un accidente con probabilidad P_d . Sin embargo, al superar la densidad crítica encontramos que no se produce ningún accidente porque el adelantamiento se hace más difícil por la falta de espacio vacío.

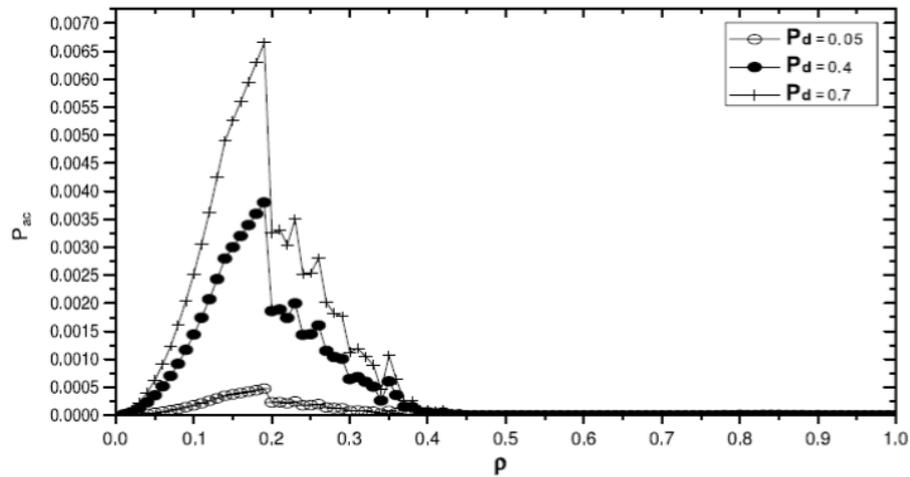


Figura 14. . Probabilidad P_{ac} como una función de la densidad para diversos P_d . Fuente: Bentaleb K., (2014).

Carril de adelantamiento

La información recopilada para carriles de adelantamiento viene recogida en la última modificación de la *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado* de 2016, donde se denominan carriles de adelantamiento a los carriles que se pueden añadir en algunos tramos de carreteras convencionales para mejorar el nivel de servicio o para reducir la accidentabilidad por falta de oportunidades de realizar una maniobra de adelantamiento.

Se dispondrán a la izquierda del carril que sea objeto de adelantamiento y no podrán coincidir en planta con carriles adicionales en rampa o pendiente.

La proyección de carriles de adelantamiento y la estimación de su longitud será objeto de un estudio de tráfico que analice los niveles de servicio.

La longitud del carril de adelantamiento se medirá entre las secciones características inicial y final de tres metros y cincuenta centímetros (3,50 m).

En carreteras convencionales, donde exista un carril de adelantamiento, se dispondrán entre ambos sentidos de circulación arcenes interiores con un ancho de un metro (1,00 m) y mediana con el ancho necesario para la preceptiva implantación de un sistema de contención de vehículos.

Los carriles de adelantamiento tendrán:

- Ancho de tres metros y cincuenta centímetros (3,50 m) y, en curvas, dicho ancho más el sobreesfuerzo correspondiente.
- Igual pendiente transversal que el carril básico existente a su derecha.

En las zonas de las carreteras convencionales donde exista carril de adelantamiento en un sentido se garantizará que la sección transversal para el sentido contrario permita que un vehículo detenido pueda ser rebasado.

Antes del inicio y después del final del carril de adelantamiento se dispondrán de cuñas de transición. Las longitudes de las cuñas de transición se establecen en función de la velocidad de proyecto de la carretera.

Al final del carril de adelantamiento y después de la cuña de transición se dispondrá adicionalmente un tramo cebreado con una longitud mayor o igual que doscientos metros (≥ 200 m) siguiendo el criterio de la Figura 15:

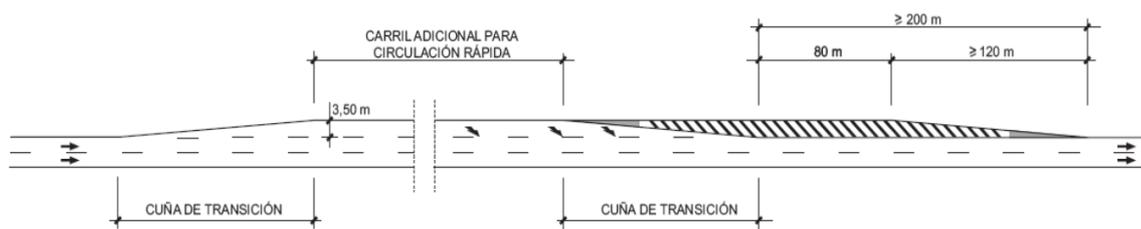


Figura 15. Carril adicional para circulación rápida. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).

La longitud central del tramo cebreado podrá reducirse, de forma justificada, siempre que se cumpla que la suma de la longitud de la cuña de transición más la longitud de dicho tramo central sea mayor o igual que la distancia de parada ($\geq D_p$) correspondiente al tramo donde se implante dicho carril de adelantamiento. .

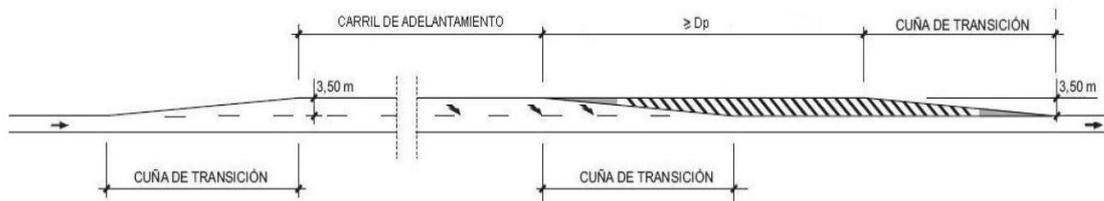


Figura 16. Carril adicional para adelantamiento con la zona cebreada reducida. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).

Cuando en un ramal de enlace o en una vía colectora - distribuidora se disponga un carril de adelantamiento su final se proyectará con la zona cebreada reducida.

Si en un tramo de una carretera convencional se proyecta una alternancia de carriles de adelantamiento entre ambos sentidos de circulación se cumplirán, salvo justificación en contrario, las siguientes condiciones:

- Entre el inicio de un carril de adelantamiento en un sentido y el inicio de un carril de adelantamiento en el sentido opuesto existirá la longitud necesaria para disponer en cada sentido la cuña de transición previa al inicio del carril de adelantamiento.
- Entre el final de un carril de adelantamiento en un sentido y el final de un carril de adelantamiento en el sentido opuesto existirá la longitud necesaria para disponer en cada sentido la zona cebreada reducida correspondiente.
- La longitud de cada carril de adelantamiento no será mayor que mil quinientos metros ($\nless 1\ 500$ m).

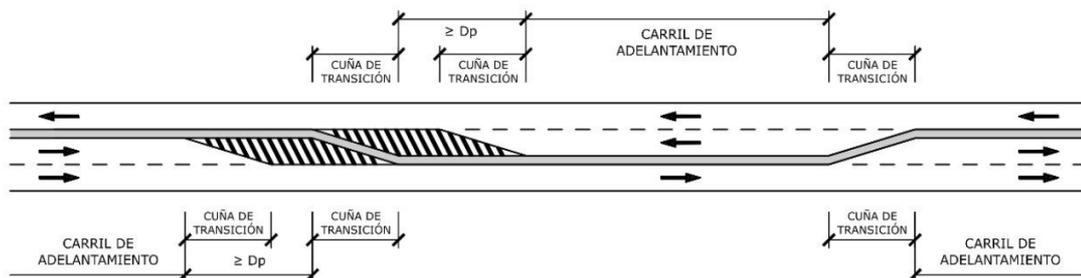


Figura 17. Carriles adicionales alternos para adelantamiento. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).

Microsimulación de tráfico

Los modelos de microsimulación, en este ámbito, es el de estudiar la funcionalidad del tráfico en una carretera en función de distintas configuraciones geométricas, y ante posibles variaciones en la demanda de tráfico. Un modelo de microsimulación es capaz de reproducir y ver de manera realista la circulación de cada vehículo, no solamente la evolución del tráfico en la red.

Así, los modelos de microsimulación de tráfico representan el comportamiento de cada elemento del flujo de tráfico en la red con sus características de conducción específicas, su origen y destino. Por consiguiente, los modelos microscópicos incluyen diferentes componentes para representar de la mejor manera las maniobras realizadas por los individuos, tales como aceleración, desaceleración o los parámetros de cambio de carril. El enfoque es de tipo micro ya que, en todo el intervalo del análisis, el comportamiento de cada vehículo individual se simula sobre la base de algoritmos de decisión de comportamiento que establecen los parámetros del viaje, tales como el cambio de carril, la distancia con el vehículo precedente, la introducción en los carriles de adelantamiento, parámetros de aceleración y desaceleración.

Las posibilidades de aplicación de un modelo de microsimulación son múltiples: el diseño de nuevas infraestructuras como carreteras, rotondas y cruces, la adopción de sistemas de control de semáforos, la creación de carriles exclusivos o de carreteras de único sentido o áreas de tráfico limitado, son sólo algunas de ellas. Estos modelos, además, son capaces de simular eventos excepcionales como accidentes, obras de construcción o de interrupciones de tráfico genéricas que, causando una limitación temporal de la capacidad de algunos tramos de la carretera, impactan en manera muy significativa las condiciones del tráfico.

Estos modelos permiten asociar a cada vehículo unas características dimensionales como de comportamiento.

Una aplicación de un modelo de microsimulación produce resultados gráficos y estadísticos. Pertenecen a las primeras animaciones bidimensionales y tridimensionales que representan las condiciones de funcionamiento instantáneos de la red. Los resultados estadísticos se refieren principalmente a las cantidades tales como los flujos, la velocidad media o el tiempo de viaje, y pueden estar relacionados con la red de carreteras en su conjunto, con algunas porciones de la misma, con ciertos caminos o con tramos de carretera individuales.

Los programas de microsimulación basan su funcionamiento en modelos capaces de representar el movimiento de cada vehículo sobre la base del comportamiento del conductor, siguiendo las normas dictadas por:

- El modelo de seguimiento (Car Following Model).
- Teoría del cambio de carril (Lane Changing).
- Teoría de aceptación de huecos (Gap Acceptance).

La primera norma, el modelo de seguimiento, se basa en que cada vehículo se mueve a lo largo de una carretera tras el vehículo de delante, su movimiento depende el vehículo al que sigue. La modelación de esta hipótesis es matemáticamente sencilla pero poco compleja en comparación con todos los comportamientos que tienen lugar durante la conducción.

Para este modelo, los conductores responden a las sollicitaciones del exterior actuando con el freno o el acelerador para mantenerse dentro de la corriente de condiciones de seguridad. Por lo tanto, si el vehículo de delante frena, el de detrás también. Además, en este modelo, por simplicidad se consideran tramos de carretera con un solo carril donde no está permitido el adelantamiento.

Este modelo está limitado porque no es capaz de reproducir adelantamientos cuando en la vida real, son necesarios. Para salvar estas deficiencias se plantea el modelo de cambio de carril (Lane Changing), utilizado para situaciones en las que el conductor decide colocarse en un carril diferente al de partida. Los principales factores evaluados en este proceso son tres: la necesidad, la oportunidad y la seguridad del cambio de carril.

El cambio de carril se podrá efectuar siempre y cuando exista un espacio aceptable entre dos coches en el carril al que se quiere llegar, esa distancia debe ser suficiente para no perturbar el flujo de tráfico en el carril de destino.

El tercer modelo, de aceptación de huecos (Gap acceptance) se formula como un problema de selección binaria en los que los conductores tienen que tomar la decisión de aceptar o rechazar el hueco disponible entre dos vehículos, y este espacio disponible se debe comparar con un intervalo crítico. Los intervalos de acceso mínimo se modelan como variables aleatorias para analizar el cambio en el comportamiento de diferentes usuarios o del mismo conductor en diferentes situaciones.

Para el estudio que se va a realizar en este Trabajo de Fin de Máster se ha decidido utilizar con el programa informático de microsimulación Aimsun. Existen otros modelos como VISSIM, Paramics, CORSIM, o TAM. Pero solo algunos de ellos como Aimsun, CROSIM o TAM pueden simular adelantamientos en carreteras convencionales. Optar por el software Aimsun es debido a que es capaz de simular la maniobra de adelantamiento.

Aimsun (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Not-urban Networks) es un software de simulación de tráfico, desarrollado y comercializado por TSS (Transport Simulation Systems) con sede en Barcelona (España), que permite simular todo tipo de elementos, desde un único carril hasta la totalidad de la red de una ciudad. Es una herramienta muy útil por la velocidad de sus simulaciones y por la combinación de la modelización de la demanda y la asignación estática y dinámica de tráfico con simulaciones macroscópicas, mesoscópicas, microscópicas e híbridas microscópica-mesoscópica en una misma aplicación de software.

Las principales peculiaridades de este programa informático es que incluye una función global para determinar el deseo de adelantar en función de la demora y la diferencia de

velocidad deseada y actual, el efecto de la visibilidad disponible en la aceptación del hueco necesario para efectuar la maniobra de adelantamiento en seguridad, la posibilidad de incrementar la velocidad durante el adelantamiento, el rechazo del deseo de adelantar en función de la distancia hasta el final de la vía y el impacto de la posición en la cola. Además, la velocidad deseada se introduce mediante una distribución lognormal, con su valor medio y desviación típica, por cada tipo de vehículo.

Aimsun cuenta con un modelo innovador de seguimiento, para carreteras de dos carriles (Two Lane Car Following Model), que sirve para forzar a los vehículos más rápidos a ponerse en el carril izquierdo para adelantar a los vehículos más lentos. Este modelo es controlado por varios parámetros definidos por el usuario, como el número de vehículos considerados, la máxima distancia por delante, la diferencia de velocidad máxima y la diferencia máxima de velocidad en el carril izquierdo.

Dentro de los resultados de salida de Aimsun, se incluyen salidas de datos del número de adelantamientos, demora, el porcentaje de tiempo en cola, la velocidad media por tipo de vehículo en cada escenario o la densidad.

En cambio, una de las limitaciones de Aimsun es que no permite comenzar un segmento de carretera con un determinado porcentaje de vehículos en cola.

El modelo de adelantamiento en carretera convencional adaptado para este estudio fue desarrollado por Llorca, C., et al. (2015) para el proyecto de investigación conocido como PASSING. El modelo incorpora en su interior el efecto de nuevos factores, como la distancia de visibilidad, la demora y el tiempo de viaje restante hasta el final del tramo considerado. Los resultados del modelo se compararon con los datos reales observados. En primer lugar, con las maniobras de adelantamiento individuales. En segundo lugar, con el flujo de tráfico, el porcentaje de vehículos en cola y el número de maniobras de adelantamiento en cuatro áreas distintas con dos niveles diferentes de tráfico. El modelo fue validado en cuatro áreas de adelantamientos diferentes.

El objetivo de la investigación era el desarrollo y calibración de un modelo de adelantamientos en el programa de microsimulación Aimsun.

La recogida de datos en la investigación de Llorca, C., (2015) se lleva cabo mediante dos procedimientos:

1. Metodología estática: consiste en tomar datos desde un punto fijo de la carretera donde se han colocado cámaras que recopilan la información de los vehículos en la zona. Seleccionaron 24 secciones de adelantamientos en ocho tramos de carretera y se dispusieron seis cámaras para tomar fotos y vídeos.
2. Metodología dinámica: este método recoge datos en distintos puntos de la carretera de forma continua, empleando vehículos instrumentados con los dispositivos necesarios (GPS, cámaras, distanciómetros láser en la parte frontal y trasera del vehículo). Se recogen datos necesarios para la investigación de la velocidad, imágenes y distancias. El vehículo empleado se llevó a seis segmentos de la carretera donde en cinco de ellos se habían tomado datos mediante la metodología estática para comparar resultados y asegurar que el método

dinámico no hubiera influido en el comportamiento de los conductores de los vehículos observados. Efectivamente, al comparar ambos resultados no se muestran diferencias entre los distintos métodos.

El modelo de adelantamientos para Aimsun microsimulación considera 14 parámetros, que surgen de la investigación realizada para PASSING, diferentes:

- Umbral de tiempo de retardo por la decisión de adelantar (s).
- Umbral mínimo para la diferencia de velocidad (km/h).
- Umbral máximo para la diferencia de velocidad (km/h).
- Tamaño máximo del pelotón para querer adelantar (vehículos).
- Número máximo de adelantamientos simultáneos (pasos).
- Retardo entre adelantamientos simultáneos (s).
- Factor de reducción para el coche-siguiente.
- Aumento de la velocidad del vehículo durante el adelantamiento.
- Umbral para la máxima diferencia entre la velocidad estándar y la velocidad durante el adelantamiento (km/h).
- Tiempo restante hasta el final del tramo de carretera simulado (s).
- Margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento (s).
- Sección espejo.
- Distancia de visibilidad en el extremo de la sección de adelantamiento (m).
- Factor de la distancia de visibilidad.

Un tramo de una carretera de dos carriles se consigue mediante la creación de una sección de dos carriles, con la generación de la parte en la dirección opuesta mediante el cambio de los atributos del modelo. Por lo tanto, cada elemento geométrico (en cada dirección) de la carretera de dos carriles se define por una sola sección Aimsun. Cada sección interactúa con una sección espejo, que representa el carril contrario.

La distancia de visibilidad disponible en correspondencia con una zona de adelantamiento se define con el parámetro ASD. Este valor corresponde a la distancia de visibilidad disponible en el final de la zona de adelantamiento. La distancia de visibilidad disminuye linealmente desde el punto de partida de dicha zona, donde es igual a ASD más la longitud total de la zona de adelantamiento, hasta el punto final de la misma.

Para cada vehículo en cola, el deseo de adelantar es evaluado sobre la base de cuatro características:

- El tiempo invertido cola (s).
- La diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real (km/h).
- Rango en cola.
- El tiempo restante de viaje hasta el final del tramo de la carretera (s).

La decisión de iniciar la maniobra de adelantamiento incluye la verificación de que ésta no sea prohibida. En el caso que otros vehículos estuvieran adelantando en el mismo

tiempo el vehículo que conduce se debe tener en cuenta si es permitido el adelantamiento simultáneo, considerando el número de adelantamientos simultáneos que se pueden hacer y si es respetado el retardo entre adelantamientos simultáneos. Si se respetan todos los factores, se evalúa la decisión de adelantar.

En caso de que la diferencia de velocidad entre la velocidad deseada y la velocidad real estuviera bajo el umbral de la diferencia de velocidad, el vehículo adelantante puede alcanzar una velocidad mayor de la deseada, igual al producto de su velocidad deseada por el factor de mejora de la velocidad del vehículo durante el adelantamiento. Este factor representa la posibilidad de viajar a una velocidad mayor que la velocidad de flujo libre deseada del conductor.

Para evaluar la decisión de adelantar, se calculan las siguientes variables:

- Tiempo de la maniobra de adelantamiento: duración de la maniobra (s), calculada suponiendo que el vehículo mantenga una aceleración constante hasta que alcance su velocidad deseada (o su velocidad de adelantamiento mejorada); después mantiene una velocidad constante.
- Tiempo de colisión (s) con el vehículo más cercano en sentido contrario: se supone que el vehículo que se aproxima mantenga una velocidad constante. En caso de que se haya ningún vehículo en sentido contrario, o si se encuentra más lejos que la distancia de visibilidad disponible en el punto de decisión, el modelo utiliza un vehículo ficticio situado en el borde de la visibilidad.
- Tiempo de señal: es el tiempo (s) hasta el final de la zona de adelantamiento identificada por señales.

El vehículo iniciará la maniobra de adelantamiento si es posible completarla antes del final de la zona de adelantamiento y si la duración de la maniobra (PT) será menor que el tiempo de colisión teniendo un margen de seguridad definido por el parámetro del margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento, diferente para cada vehículo.

Una vez que la ejecución del adelantamiento se ha decidido, el vehículo acelera con su máxima aceleración hasta la velocidad deseada.

En este punto se calcula una variable adicional: tiempo requerido para abortar, es el tiempo (s) que el vehículo que adelanta requiere para desacelerar y volver a su propio carril sin pasar al vehículo más lento. El punto crítico es aquel donde el tiempo de la maniobra de adelantamiento es igual al tiempo requerido para abortar.

La calibración del modelo de adelantamiento desarrollado para este estudio se divide en dos etapas:

1. Se prueba el modelo desde el punto de vista de la conducción individual. Esta parte sirve para verificar que las decisiones del conductor y las maniobras fueron lo suficientemente cercanas a las observaciones.
2. Se compara las medidas operacionales entre la realidad y el modelo simulado de cuatro zonas del adelantamiento diferentes y para dos volúmenes de tráfico.

En la primera etapa, análisis del comportamiento del individuo, se ha calibrado el valor de los siguientes parámetros, que controlan la decisión y la ejecución del adelantamiento:

- Aceleración máxima (tipo de vehículo): tasa máxima de aceleración de los vehículos.
- Velocidad deseada (tipo de vehículo): la velocidad deseada en flujo libre de vehículos.
- Factor de aceptación de velocidad (tipo de vehículo): factor que multiplica el límite de velocidad para permitir excederlo.
- Factor de sensibilidad para reducir el car-following.
- Mejora de la velocidad del vehículo adelantante.
- Umbral de diferencia de velocidad para mejorar la velocidad del vehículo de adelantamiento.
- Margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento.

Los valores de estos parámetros fueron seleccionados de acuerdo a los valores predeterminados de Aimsun: para los tres primeros parámetros. El resto de parámetros se seleccionaron en base al comportamiento observado o a un análisis de sensibilidad.

Para la segunda etapa, calibración del modelo, se realizaron 15 replicaciones.

La validación del modelo consiste en aplicar el modelo calibrado a otros escenarios para proporcionar información acerca de la capacidad del modelo de representar una variedad de situaciones, y no sólo aquellas en particular utilizadas para la calibración.

En el proceso de validación se probó el modelo calibrado en cuatro zonas de adelantamiento diferentes: con un volumen bajo y alto de tráfico, con zonas de adelantamiento cortas y largas, con diferentes divisiones direccionales y porcentaje de vehículos pesados.

Los resultados de la validación muestran que este modelo también se puede aplicar a condiciones significativamente diferentes de las de los escenarios de calibración, pero los resultados de la calibración y validación de este modelo dependieron de los datos recogidos; por lo tanto, cualquier extrapolación a otras condiciones y escenarios debe tomarse con cuidado.

Hasta el momento, Monterosso, L., (2015) realizó la creación de configuraciones de escenarios para analizar la funcionalidad en carreteras 2+1 basándose en los resultados obtenidos de la validación del modelo de adelantamiento desarrollado por Llorca, C., por lo que, el modelo elaborado por Monterosso, L., que considera datos de carreteras 2+1 de Polonia y asume el modelo de adelantamientos descrito en la literatura, se tomará como guía para el desarrollo del escenario a crear en este Trabajo Final de Máster.

Limitaciones del conocimiento

Los estudios existentes sobre carreteras 2+1 no son numerosos en comparación con temas que sí han sido más investigados. Esto representa la oportunidad a seguir avanzando en el conocimiento de esta medida como acción para mejorar la seguridad vial y para conocer si la funcionalidad en las carreteras de este tipo es buena. A pesar de que no existe actualmente ninguna normativa en la que se clasifique las carreteras 2+1 en función al nivel de servicio. Únicamente existe la clasificación del HCM 2010 para carreteras convencionales, que será lo que sirva de guía para esta investigación.

Es un tema relativamente novedoso del que todavía hay muchos aspectos por conocer y detallar, de ahí surge el objetivo de este Trabajo de Fin de Máster; colaborar en el desarrollo del conocimiento de este tipo de carreteras en vías de expansión, que cada vez más, resultan de interés a numerosos países, con el fin de reducir el número de accidentes de tráfico y mejorar el nivel de servicio de las vías.

De los documentos consultados en el Estado del Arte se perciben carencias, como, por ejemplo, en los modelos de tráfico empleados. Pues no se conoce suficiente sobre el comportamiento de los conductores y, por tanto, no se puede asegurar que sea razonable. Hasta el momento ninguna investigación ha detallado sobre la posición de los adelantamientos, si empiezan/terminan al principio/antes del final del tramo de adelantamiento.

Por otro lado, la necesidad de datos de carreteras 2+1 en España hace que hasta ahora las investigaciones hayan asumido datos de observaciones de países en los que el comportamiento de los conductores puede no ser el mismo que en España, lo cual se debería verificar en un futuro.

En este trabajo se quiere determinar cuál sería la longitud óptima del carril de adelantamiento mediante el empleo de un programa de microsimulación de tráfico, y simular sobre ocho configuraciones geométricas de escenarios y para distintas demandas de tráfico con el fin de determinar un diseño óptimo de secciones 2+1.

Objetivos e hipótesis

Objetivos

En este apartado se establece el objeto de la investigación que se va a llevar a cabo en este Trabajo Final de Máster, la caracterización funcional del tráfico en carreteras 2+1 por medio de un programa informático de microsimulación del tráfico en el que generar distintos escenarios donde analizar la funcionalidad del tráfico variandola longitud de los carriles de adelantamiento y con la intención de formular los criterios de diseño para esta tipología de carreteras.

Para alcanzar el objetivo principal se ha desglosado en una serie de objetivos específicos:

- Diseño experimental: Diseño de los tramos experimentales de carretera 2+1 que permitan analizar la influencia de las características geométricas, longitud del carril de adelantamiento, en la funcionalidad (porcentaje de adelantamientos, porcentaje de vehículos en cola y velocidad media de recorrido).
- Caracterización del comportamiento del tráfico en la carretera 2+1 simulada, considerando las variables de tráfico (intensidad direccional, composición del tráfico), en base a las medidas de desempeño de carreteras 2+1.
- Propuesta de criterios de diseño de carreteras 2+1.
- Aplicación de los criterios propuestos a un caso de estudio. Diseño de una carretera 2+1 como alternativa a un tramo existente de carretera convencional.

Hipótesis

En base al Estado del Arte, se establecen las hipótesis principales del estudio, que se corroborarán o rechazarán en el desarrollo del Trabajo Final de Máster.

En primer lugar, la frecuencia de adelantamientos se producirá al inicio del tramo de adelantamiento, será en las primeras posiciones de dicho tramo o sección 2+1 donde comenzarán los adelantamientos, de manera que exista un margen al final del tramo en el que los vehículos se incorporan al carril de no-adelantamiento para continuar con su trayectoria.

En segundo lugar, la longitud de las zonas de adelantamiento será de gran influencia en la funcionalidad del tráfico en este tipo de carreteras. Las configuraciones con zonas de adelantamiento de mayor longitud serán más funcionales que aquellas con zonas más cortas. Además, cuanto mayor sea la intensidad de tráfico en la carretera, mayor debería ser la longitud del tramo de adelantamiento.

En tercer lugar, debido a la presencia del carril de adelantamiento las velocidades serán ligeramente más altas en secciones 2+1.

Estas hipótesis serán comprobadas mediante el análisis de los resultados y se aceptarán o rechazarán en función de los resultados finales del estudio.

Alcance

Teniendo en cuenta los objetivos e hipótesis enumerados, el Trabajo Final de Máster parte con unas limitaciones previas a la investigación:

- Ausencia de datos experimentales en carreteras 2+1 españolas con los que validar el modelo. Se obtienen datos estimados generados por las simulaciones del tráfico.
- Escenarios de longitud hasta 10 km y velocidad de proyecto 100 km/h.
- Condiciones meteorológicas favorables.

Metodología

La metodología que se ha llevado a cabo para el desarrollo de este Trabajo Final de Máster consta de dos partes; por un lado se detalla una explicación de la creación del escenario, donde se realizan las microsimulaciones de carreteras 2+1 en el programa informático Aimsun, previa elección de la geometría y diferentes casos de estudio en los que cambian las variables de tráfico, intensidades y el porcentaje de vehículos pesados, y por otro lado, se definen los criterios de longitud óptima para una sección 2+1 a aplicar sobre un tramo de carretera de la Comunidad Valenciana, concretamente en la CV-405. Para determinar la longitud óptima de zona de adelantamiento se toman los datos de tráfico medidos experimentalmente por Moreno, A. T., (2015) para su Tesis Doctoral.

En primer lugar, se procede al diseño experimental, en este caso consiste en determinar los escenarios sobre los que reproducir el funcionamiento de una carretera 2+1 mediante el programa informático Aimsun.

Se definen ocho escenarios de simulación con diferentes longitudes de zona de adelantamiento, aumentando de 500 en 500 m. Sobre estos escenarios se van a estudiar las diferentes medidas de desempeño (porcentaje de adelantamientos, porcentaje de vehículos en cola y velocidad media de recorrido) para establecer los criterios de longitud óptima en función de los diferentes escenarios y variables de tráfico implementados en el programa.

El análisis de las medidas de desempeño, con las que se pretende determinar los criterios de longitud óptima, se va a llevar a cabo con datos ficticios, por lo que, las simulaciones se replicarán 15 veces, con el fin de que la aleatoriedad de los datos generados no repercuta en los resultados obtenidos del análisis. El autor Lorca, C., en estudios previos sobre variabilidad de los resultados, determinó que esta no es significativa si se realizan las simulaciones 15 veces.

Por último, una vez se hayan establecido los criterios de longitud óptima, el siguiente paso será ejecutar el caso práctico sobre la CV-405. Actualmente, este tramo de carretera es convencional y lo que se persigue es ver cómo sería el comportamiento del tráfico que caracteriza a esta carretera si la misma fuese una carretera 2+1. Se busca de comparar las diferencias de funcionalidad de tráfico para el caso de una carretera convencional o una carretera 2+1 parcial.

Creación del escenario

El comienzo de este estudio consiste en la creación de los escenarios donde reproducir el funcionamiento de una carretera 2+1 y el comportamiento de los conductores en ella. Son creados en el programa informático Aimsun, que cuenta con un modelo de simulación.

La finalidad de los modelos de simulación, en este ámbito, es estudiar la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1 ante posibles variaciones en la demanda de tráfico.

Una de las razones por las que se ha empleado este programa es por la presencia del modelo “Two Lane Car Following”, que hace que los vehículos simulados adelanten cuando se cumplan una serie de condiciones, mencionado en el Estado del Arte.

El primer paso para desarrollar la implementación de escenarios en Aimsun consiste en la definición geométrica de la carretera 2+1 que se va a estudiar, con los diferentes tramos de adelantamiento.

Se ha decidido representar un segmento de carretera de 10 km de longitud total en el que las secciones 2+1 son alternas y simétricas para los dos sentidos de circulación. En total se plantean ocho configuraciones geométricas de escenarios de simulación con distintas longitudes de adelantamiento.

Para llegar a las dimensiones definitivas de la Figura 19, más adelante, se ha empleado la actualizada *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado* para determinar las dimensiones de las cuñas de transición, necesarias por seguridad, en este tipo de carreteras.

En base a la norma mencionada, antes del inicio y después del final del carril de adelantamiento se dispondrán unas cuñas de transición. La longitud de las cuñas viene dada por la tabla 8.1 de la *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado* en función de la velocidad de proyecto de la carretera; para este caso se ha optado por una velocidad de proyecto en la carretera simulada de 100 km/h. Por lo tanto, la longitud de las cuñas de transición es de 125 m.

Por otro lado, cuando se proyecta una alternancia de carriles de adelantamiento entre ambos sentidos de circulación es de gran importancia lo siguiente: “entre el final de un carril de adelantamiento en un sentido y el final de un carril de adelantamiento en el sentido opuesto existirá la longitud necesaria para disponer en cada sentido la zona cebreada reducida correspondiente”, estas líneas se resumen cumpliendo con las dimensiones de la Figura 18.

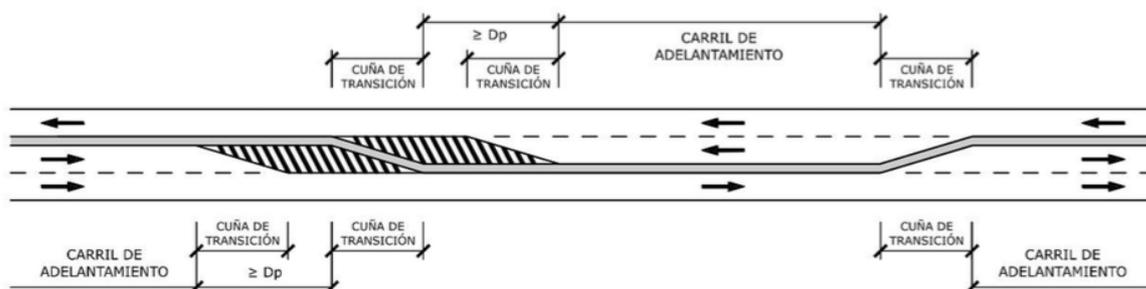


Figura 18. Carriles adicionales alternos para adelantamiento. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).

En la Figura 18, para la carretera con velocidad de proyecto de 100 km/h, las dimensiones tendrán los valores siguientes:

- Cuña de transición, $L_c = 125$ m.
- Distancia de parada, D_p :

$$D_p = \frac{V \cdot t_p}{3,6} + \frac{V^2}{254 \cdot (f_l + i)} \quad (1)$$

donde:

V = Velocidad al inicio de la maniobra de frenado, 100 km/h.

f_l = Coeficiente de rozamiento longitudinal movilizado rueda-pavimento, 0,320.

i = Inclinación de la rasante (en tanto por uno), 0.

t_p = Tiempo de percepción y reacción (s), se adopta un valor de 2 s.

$$D_p = \frac{100 \cdot 2}{3,6} + \frac{100^2}{254 \cdot (0,32 + 0)} = 178,6 \text{ m}$$

- Carril de adelantamiento = variable según el escenario, L_{ZA} .

Las longitudes de la zona de adelantamiento (L_{ZA}) para cada escenario de microsimulación vienen recogidas en la Tabla 3:

Escenarios	L_{ZA} (m)
1	500
2	750
3	1250
4	1750
5	2250
6	2750
7	3250
8	0

Tabla 3. Longitud de zonas de adelantamiento por escenarios introducidos en Aimsun.

De tal modo que las zonas de adelantamiento y las zonas de no-adelantamiento totales, contando con las cuñas de transición y cebreado central reducido, se definen mediante las expresiones (2) y (3), como:

$$L_{sí} = L_{ZA} + 2 \cdot \text{Cuñas de transición} = L_{ZA} + 2 \cdot 125 \text{ m} \quad (2)$$

$$L_{no} = L_{sí} + 231 - 125 = L_{sí} + 106 \text{ m} \quad (3)$$

En la Tabla 4 se recogen en detalle las longitudes de los tramos de adelantamiento y de no-adelantamiento que figuran en cada escenario simulado.

PK	Escenarios de microsimulación							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Inicio	0	0	0	0	0	0	0	0
L _{NOA}	856	856	856	856	856	856	856	10000
L _{SIA}	1606	1856	2356	2856	3356	3856	4356	
L _{NOA}	2462	2962	3962	4962	5962	6962	7692	
L _{SIA}	3212	3962	5462	6962	8462	9962	10000	
L _{NOA}	4068	5068	7068	9068	10000	10000		
L _{SIA}	4818	6068	8568	10000				
L _{NOA}	5674	7174	10000					
L _{SIA}	6424	8174						
L _{NOA}	7280	9280						
L _{SIA}	8030	10000						
L _{NOA}	8886							
L _{SIA}	9636							
L _{NOA}	10000							

Tabla 4. Posición de LZA y LZNA.

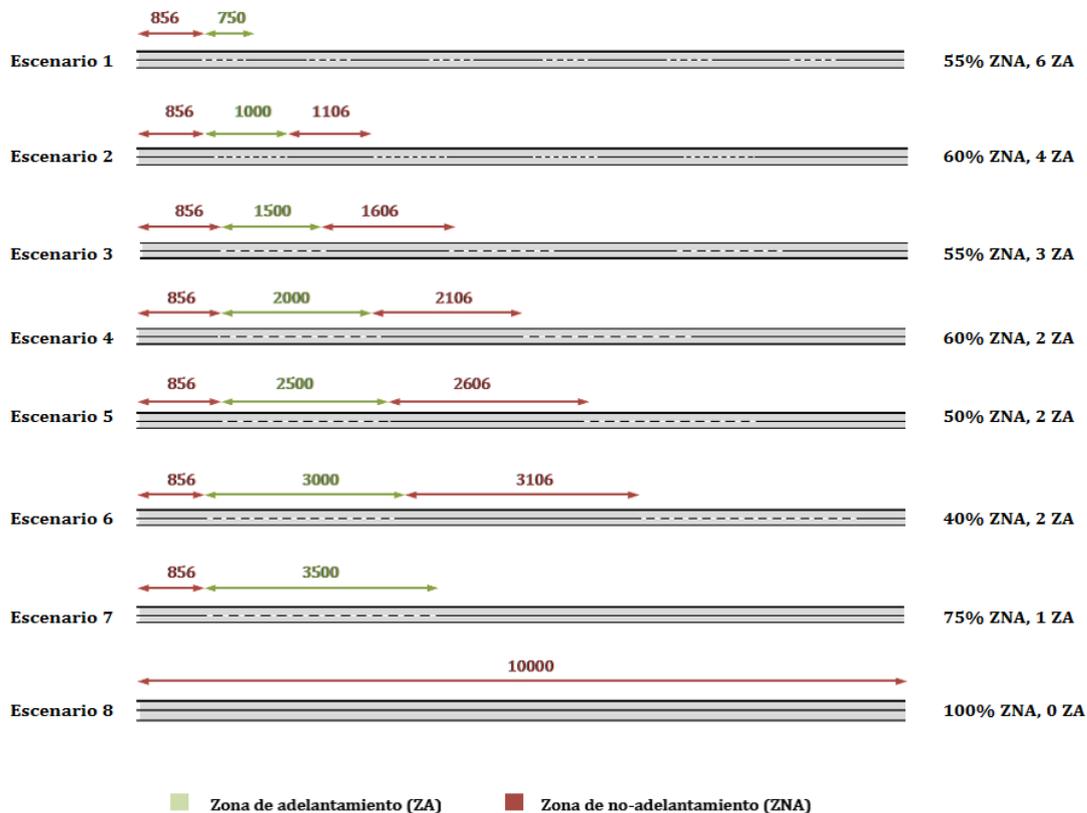


Figura 19. Esquema de los escenarios de simulación en la dirección principal.

La Figura 19 representa el esquema de los escenarios por orden, de arriba hacia abajo, de mayor a menor número de zonas de adelantamiento permitido y de menor a mayor longitud de las mismas.

Una vez definida la geometría de cada escenario a implementar en Aimsun, se procede a la introducción de parámetros específicos en el programa, con el objetivo de conseguir el comportamiento de una 2+1 razonable.

Primero se genera la red, segmento de carretera con longitud de 10 km, mediante selección de la herramienta de carretera convencional y se crea su respectiva sección espejo, ambas igual caracterizadas. La sección espejo es muy importante para conseguir el funcionamiento de la carretera 2+1, pues para el caso de estudio se va a simular un único sentido del flujo, que, si no fuera por la presencia de la sección espejo los vehículos circularían en los dos sentidos de circulación.

Con la presencia de la sección espejo se consigue simular de forma ficticia el flujo de tráfico en la dirección opuesta a la dirección principal; por lo que, la sección espejo se crea siempre para la carretera de cada escenario a simular. Cada sección tiene una velocidad límite específica y una determinada distancia de visibilidad.



Figura 20. Captura de pantalla del software Aimsun, sección principal y espejo.

En segundo lugar, tal y como se menciona en la microsimulación del Estado del Arte, Llorca et al. establecieron que el deseo de adelantamiento de un vehículo en Aimsun se evalúa cuando está en cola. Esto ocurre cuando la velocidad actual del vehículo es inferior a su velocidad deseada, cuando circula detrás de un vehículo más lento. El deseo de adelantar depende de cuatro variables:

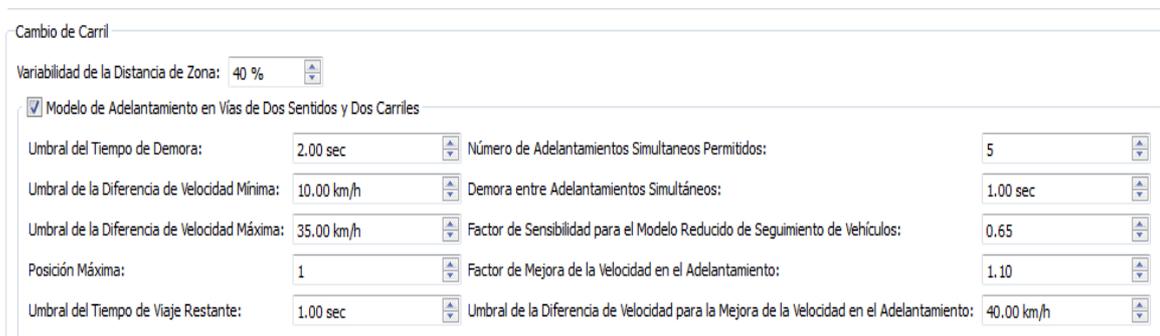
- Demora acumulada.
- Diferencia de velocidades entre la velocidad deseada y la velocidad del líder.
- Orden en la cola.
- Tiempo hasta el final de tramo de carretera.

Una vez se ha decidido adelantar, el vehículo acelera a su máxima tasa de aceleración (definida por su distribución en Aimsun) hasta alcanzar la velocidad deseada.

El modelo de microsimulación considera 14 parámetros que se han definido según correspondan al vehículo (ligero o pesado), a la sección o al experimento. Son los siguientes:

- Umbral de tiempo de demora (s).
- Umbral de la diferencia de velocidad mínima (km/h).
- Umbral de la diferencia de velocidad máxima (km/h).
- Posición máxima.
- Umbral del tiempo de viaje restante (s).
- Número de adelantamientos simultáneos permitidos.
- Demora entre adelantamientos simultáneos.
- Factor de sensibilidad para el modelo reducido de seguimiento de vehículos.
- Factor de mejora de la velocidad en el adelantamiento.
- Umbral de la diferencia de velocidad para la mejora de la velocidad en el adelantamiento.
- Margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento (s).
- Sección espejo.
- Distancia de visibilidad en el extremo de la sección de adelantamiento (m).
- Factor de distancia de visibilidad.

De los parámetros enumerados, los diez primeros caracterizan al experimento, el onceavo al vehículo, y los tres últimos se especifican para la sección. Los valores asignados se resumen en las Figuras 21, 22 y 23.



Parámetro	Valor
Variabilidad de la Distancia de Zona	40 %
Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos y Dos Carriles	✓
Umbral del Tiempo de Demora	2.00 sec
Número de Adelantamientos Simultáneos Permitidos	5
Umbral de la Diferencia de Velocidad Mínima	10.00 km/h
Demora entre Adelantamientos Simultáneos	1.00 sec
Umbral de la Diferencia de Velocidad Máxima	35.00 km/h
Factor de Sensibilidad para el Modelo Reducido de Seguimiento de Vehículos	0.65
Posición Máxima	1
Factor de Mejora de la Velocidad en el Adelantamiento	1.10
Umbral del Tiempo de Viaje Restante	1.00 sec
Umbral de la Diferencia de Velocidad para la Mejora de la Velocidad en el Adelantamiento	40.00 km/h

Figura 21. Captura del software Aimsun. Parámetros correspondientes al experimento.

Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos

	Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Margen para la Maniobra de Adelantamiento	8.00 segs	1.00 segs	3.00 segs	15.00 segs

Figura 22. Captura de pantalla software Aimsun. Parámetro correspondiente al vehículo.

Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos y Dos Carriles

Sección Espejo:

Distancia de Visibilidad:

Factor de Visibilidad:

Figura 23. Captura de pantalla software Aimsun. Parámetros de la sección.

De los parámetros de sección se ha de comentar que, se entiende por distancia de visibilidad, para carreteras 2+1, como aquella distancia definida hasta el extremo de una sección de adelantamiento, donde el modelo del intervalo de acceso mínimo comenzará a ser aplicado, para inducir a los conductores al carril de la derecha antes de que la sección de adelantamiento termine. En el modelo implementado se ha establecido un valor relativamente bajo de distancia de visibilidad para que así los vehículos que deseen realizar la maniobra de adelantamiento, lo hagan antes de finalizar el carril de adelantamiento.

Se ha tomado un valor de distancia de visibilidad de 20 m para el caso a estudiar, de manera que cuando un vehículo rápido desee adelantar, con esos metros sea suficiente para realizar el adelantamiento y volver al carril de la derecha.

Estos parámetros mencionados son muy importantes para el buen funcionamiento del modelo, además, deben coincidir para las secciones principales y las secciones espejo.

Hasta ahora, el modelo ha quedado definido, a falta de calibrarlo. Cuando se introducen intensidades de tráfico, la simulación reproduce una hora de tráfico en la carretera implementada. Durante la hora simulada, los datos obtenidos se dividen en intervalos de 15 minutos, tal y como establece el Manual de Capacidad (HCM 2010).

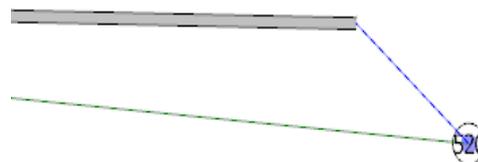


Figura 24. Captura software Aimsun. Nodos de generación de tráfico.

Las intensidades de tráfico de los escenarios se introducen en la matriz origen/destino completando las celdas con el valor de intensidad direccional con el que se quiera

simular la carretera. Los datos origen/destino se corresponden con el nodo que genera el tráfico y nodo al que llega dicho tráfico.

El valor de la celda de la matriz origen/destino que corresponde al flujo en la dirección opuesta respecto a la del tramo principal se ha establecido igual a cero, porque no se quiere tener vehículos en sentido contrario al carril derecho, únicamente se pretende influir en el comportamiento de los conductores para que se respeten los flujos que se quieren estudiar.

Para asegurar que los vehículos circulan por el carril deseado se han colocado detectores en todos los escenarios, situados a la entrada de la sección y en los puntos medios de cada tramo, de adelantamiento y no-adelantamiento; gracias a la presencia de este instrumento se obtienen salidas de datos para poder evaluar el comportamiento de los vehículos a nivel individual.



Figura 25. Captura software Aimsun. Detector a la entrada de la sección.

Se ha decidido no considerar, en la obtención de datos, los primeros 60 minutos de la simulación porque se corresponden al calentamiento inicial y durante ese tiempo los vehículos circulan en condición de régimen estacionario en lugar de la de flujo libre. Por este motivo, en el análisis de los resultados obtenidos se consideran los datos generados una vez finalizado el calentamiento.

Generados los escenarios en Aimsun, lo siguiente es la calibración del modelo.

Calibración del modelo

El proceso de determinar si un modelo de simulación representa de forma adecuada el sistema objeto de estudio, se consigue a través de la calibración y la validación, según afirma Barceló (2010). El objetivo de la calibración es encontrar los valores de los parámetros del modelo que son válidos en un escenario concreto. Tras la calibración, la validación responde a la cuestión de si la simulación ofrece una representación precisa o no, comparando el modelo calibrado con otro conjunto de datos distintos al empleado en la calibración.

En este caso, el objetivo de la calibración es que los valores asignados a las variables consideradas en el modelo sean tales que, reduzcan al mínimo la diferencia entre los valores de los parámetros modelados y los que tendría una carretera real con las mismas características. De manera que la simulación del tráfico presente un comportamiento fiel a la realidad.

La calibración se hace para dos niveles: microscópico y macroscópico.

Nivel microscópico

Para esta fase de calibración se han mantenido parámetros por defecto, otros tienen valores establecidos por Llorca, C., (2015) y en su caso, datos procedentes de trabajos anteriores, “Análisis de la funcionalidad de una carretera 2+1 mediante microsimulación”, Monterosso, L. (2015), basados en datos de Polonia. Tal como se mencionó en el apartado de Estado del Arte, en aquel estudio se ajustó el valor de los parámetros tras verificar que el número de adelantamientos producidos en secciones de adelantamiento de diversas longitudes se ajustaba a los datos observados en carreteras 2+1 de Polonia.

Asumiendo dichos valores de los parámetros de Aimsun, se está asumiendo también que el comportamiento de conductores en las carreteras 2+1 de Polonia y de España es similar, algo que, en el futuro, debería verificarse en detalle.

En esta etapa se persigue obtener valores de parámetros como:

- Máxima aceleración de cada vehículo, asignadas por defecto.

Tipo de vehículo	Media(m/s ²)	Desviación(m/s ²)	Mínimo(m/s ²)	Máximo(m/s ²)
Ligero	3	0,2	2,60	3,40
Pesado	1	0,5	0,6	1,8

Tabla 5. Valores por defecto de la aceleración máxima.

- Distribución de velocidad máxima deseada de cada vehículo, asignadas por defecto por el programa.

Variable		Vehículo ligero	Vehículo pesado
V _{max} (km/h) (lognormal)	Media	110	85
	Desviación típica	10	10
	Mínimo	80	70
	Máximo	150	100
Velocidad máxima permitida		100 km/h	

Tabla 6. Valores por defecto de la velocidad deseada.

- Factor de aceptación de la velocidad de cada vehículo.

Tipo de vehículo	Media(m/s ²)	Desviación(m/s ²)	Mínimo(m/s ²)	Máximo(m/s ²)
Ligero	1,1	0,1	0,9	1,3
Pesado	1,05	0,1	1	1,1

Tabla 7. Valores por defecto del factor de aceptación de la velocidad.

- Factor de reducción del modelo de seguimiento *RCF* (experimento).

Según explica Llorca, C. (2015) en su Tesis Doctoral, en cuanto al *RCF*, se detectó que un aumento en dicho valor suponía un importante aumento en el tiempo de la maniobra de adelantamiento. El valor que minimizaba las diferencias entre el tiempo medio de adelantamiento observado y simulado fue el de 0,65.

- Factor de ampliación de la velocidad durante el adelantamiento *PVSE* (experimento).
- Umbral para la ampliación de la velocidad durante el adelantamiento *PVSETh* (experimento).

En cuanto a *PVSE* y *PVSETh*, para la creación de un modelo de microsimulación, Lloca, C. observó que ambos factores no tenían influencia significativa en los tiempos de adelantamiento. Por lo que, el primero de ellos tiene un valor de 1,1, ya que, en localizaciones con un límite de velocidad de 100 km/h, solo el 5% de los conductores finalizaba la maniobra con una velocidad superior a 110 km/h. El segundo se ha dejado el valor por defecto del programa.

- Margen de seguridad para el adelantamiento *Safetymargin* (mínimo, máximo, media y desviación típica) (vehículo).

Estos valores se determinan según la comparación en la aceptación de huecos, realizada por Llorca, C., (2015), se pretendían fijar los valores de *Safetymargin*. Partiendo de los resultados del análisis del estudio experimental, se prefijaron los valores extremos en un mínimo de 1 s y máximo 10 s. Para definir los valores de la media y desviación típica se toman aquellos que minimizan las diferencias entre hueco crítico medio simulado y el observado (aquel con una probabilidad de aceptación de 0,5) fueron una media de 5 s y una desviación típica de 3 s. El valor del hueco crítico medio para maniobras sin vehículos opuestos visibles es de 26,5 s.

Nivel macroscópico

La calibración a nivel macroscópico se ha basado en los análisis llevados a cabo Llorca, C., al igual que en la fase de calibración a nivel microscópico. Para ello, en el análisis de sus resultados, se usó un intervalo de agregación de 15 min, conforme a lo establecido en el Manual de Capacidad de Carreteras (Transportation Research Board, 2010).

Los parámetros del modelo de adelantamiento que deben determinarse son:

- MaxRank = 1. Porque en España no se permite adelantar a un vehículo que ya está siendo adelantado.
- MaxSimul = 1. En España no se contempla la posibilidad de adelantamientos simultáneos.
- RemainingtimeTh = 0, porque el experimento se llevó a cabo en zonas de adelantamiento aisladas.
- MaxdV= 35 km/h.
- MindV = 10 km/h.
- DelayTh = 240 s.

Con los tres últimos parámetros se fijan los valores del modelo de deseo de adelantamiento que mejor reproduzca el número de adelantamientos en las zonas analizadas en la Tesis Doctoral de Llorca, C., (2015).

Tal y como se ha comentado, en un modelo de microsimulación, la mayoría de variables de entrada con valores aleatorios está dentro de una distribución predefinida en el programa. Una replicación es la simulación de un escenario tomando un conjunto de valores particulares de las variables aleatorias. Para caracterizar el comportamiento del sistema representado, es necesario un cierto número de replicaciones o semillas aleatorias.

Por último, con el objetivo de que los vehículos que entren en las secciones de adelantamiento tengan las mismas características, se ha colocado un carril adicional previo a la entrada de cada escenario. Gracias a este carril se forman colas a la entrada, por lo que, los vehículos cumplirán los requisitos de adelantamiento expuestos anteriormente. Es decir, se genera el porcentaje de vehículos en cola deseado al inicio de la sección completa.

En este caso, se aconseja que la longitud de no-adelantamiento hasta la primera sección de 2+1 esté comprendida entre 1 o 2 km, para el escenario creado se han colocado los 500 m de tramo inicial en cabecera más 856 m que son los que corresponden al primer tramo de longitud de no-adelantamiento en el primer escenario. De modo que, todos los escenarios cuentan con una distancia inicial de no-adelantamiento de 1356 m, comprendida entre la longitud recomendada de 1-2 km.

Validación

La validación busca verificar que el escenario creado es aplicable a escenarios distintos, para comprobar que ese modelo puede representar variedad de situaciones.

En cambio, para este Trabajo Final de Máster no hay disponibilidad de datos experimentales con lo que validar el modelo, pues no se tienen datos de tráfico, hasta el momento, de ninguna carretera 2+1 en España. Se supone que el comportamiento de los vehículos cumple con los valores asignados en Aimsun, la mayoría de ellos tomados en carretera convencional o carreteras 2+1 de Polonia. En ese caso, será necesario verificar detalladamente, en un futuro, que la calibración se ajusta a lo real.

Análisis

Análisis de escenarios

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas sobre las ocho configuraciones de escenarios propuestos, con el fin de evaluar la funcionalidad del tráfico en una carretera 2+1. Este análisis se lleva a cabo mediante el estudio de las medidas de desempeño que permiten determinar la funcionalidad del tráfico. Para este caso, se ha estudiado:

- Frecuencia de adelantamientos.
- Porcentaje de adelantamientos.
- Porcentaje de vehículos en cola (PF).
- Velocidad puntual de los vehículos.
- Velocidad media de escenarios (ATS).

Las zonas de adelantamiento se pueden clasificar como:

- Zonas cortas: longitud inferior a 500 m.
- Zonas medias: longitud entre 500 y 1000 m.
- Zonas largas: longitud entre 1000 y 1500 m.
- Zonas muy largas: longitud superior a 1500 m.

En cuanto al tráfico, se ha variado de la siguiente manera:

- Tres porcentajes de vehículos pesados: 0%, 10% y 20%.
- No se considera reparto, pues en las carreteras 2+1 no influye el volumen de tráfico en sentido opuesto.
- Volumen de tráfico direccional variable entre 100-1900 veh/h, con saltos de 600 veh/h.

Variable	Distribución zonas adelantamiento	% Vehículos pesados (HV)	Volumen direccional (veh/h)	Réplicas
Valores	55% ZNA, 6 ZA	0 10 20	100 700 1300 1900	15 replicaciones
	60% ZNA, 4 ZA			
	55% ZNA, 3 ZA			
	60% ZNA, 2 ZA			
	50% ZNA, 2 ZA			
	40% ZNA, 2 ZA			
	75% ZNA, 1 ZA			
100%ZNA, 0 ZA				

Tabla 8. Escenarios simulados en Aimsun para el análisis.

Se va a suponer que las carreteras 2+1 planteadas presentan un nivel de servicio como las convencionales de clase I, que según establece el HCM 2010, se caracterizan por el deseo de circular a altas velocidades y con demoras reducidas. Por ello, puede aceptarse que, desde el punto de vista de los conductores, estas carreteras se parecen a las carreteras 2+1.

Estudio de la frecuencia de adelantamientos

En este apartado se pretende determinar las posiciones donde tienen lugar las maniobras de adelantamiento una vez los vehículos han entrado en la sección 2+1.

De manera que se han evaluado dos de las configuraciones de escenarios planteadas, concretamente el escenario 1 y 5, con longitudes efectivas de adelantamiento de 500 y 2500 m, pues en este caso no es necesario entrar más en detalle, ya que, únicamente se busca conocer la posición de los adelantamientos, y el margen que queda en el carril de adelantamiento una vez es ejecutada dicha maniobra.

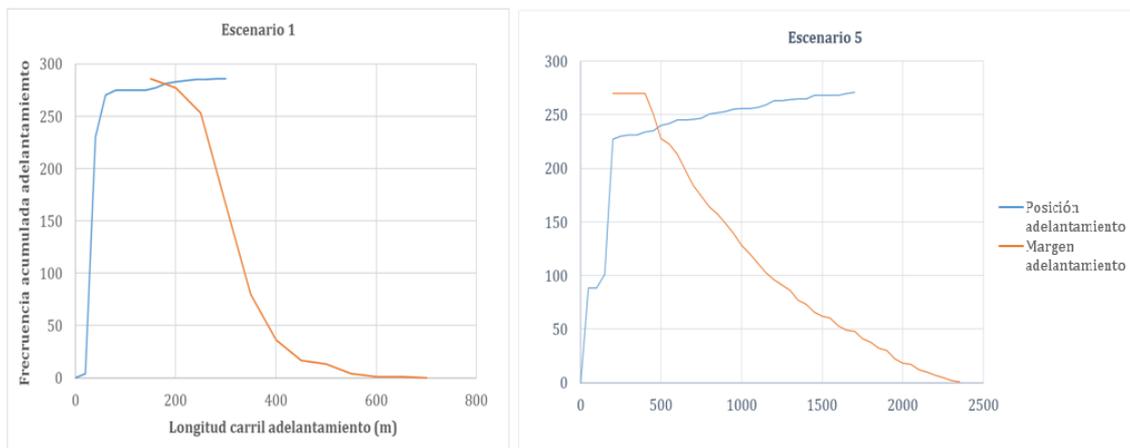


Figura 26. Posición inicio y fin adelantamientos en Escenarios 1 y 5.

Mediante este gráfico lo que se muestra es que la mayoría de las maniobras de adelantamiento tienen lugar al principio de la sección 2+1.

Para el escenario 1 se observa que se producen hasta la primera mitad del tramo, dejando margen suficiente para realizar la maniobra de adelantamiento hasta que la sección acabe. A medida que se avanza en el carril de adelantamiento el margen es menor y por tanto ya los coches no adelantan porque no tienen suficiente distancia de visibilidad. En cambio, en el escenario 5, al ser mayor la longitud de adelantamiento, lógicamente los vehículos pueden realizar la maniobra en posiciones más avanzadas en la sección.

A pesar de ello, se observa la similitud en ambas representaciones de la Figura 26 donde la diferencia entre longitudes de adelantamiento, 500 y 2500 m, presenta que la gran mayoría de vehículos adelantan al comienzo del tramo y son casos puntuales los que

esperan a puntos cercanos al final del carril de adelantamiento para realizar la maniobra.

Estudio detallado de adelantamientos

En base al apartado anterior, donde se ha observado que los adelantamientos se producen al inicio de la sección 2+1, se pasa a estudiar el porcentaje de adelantamientos que ocurre en los ocho escenarios, para las demandas de tráfico propuestas y para los tres porcentajes de vehículos pesados.

Se entiende como porcentaje de adelantamientos el porcentaje de maniobras de adelantamiento registradas (veces que un vehículo ocupa el carril de adelantamiento) respecto del total de vehículos en la dirección de estudio.

De la salida de datos se observa que cuando se obtiene un porcentaje superior al 100% indica que hay vehículos que adelantan varias veces. En cambio, una limitación del programa Aimsun, es que no tiene en cuenta cuantos vehículos son rebasados en cada maniobra.

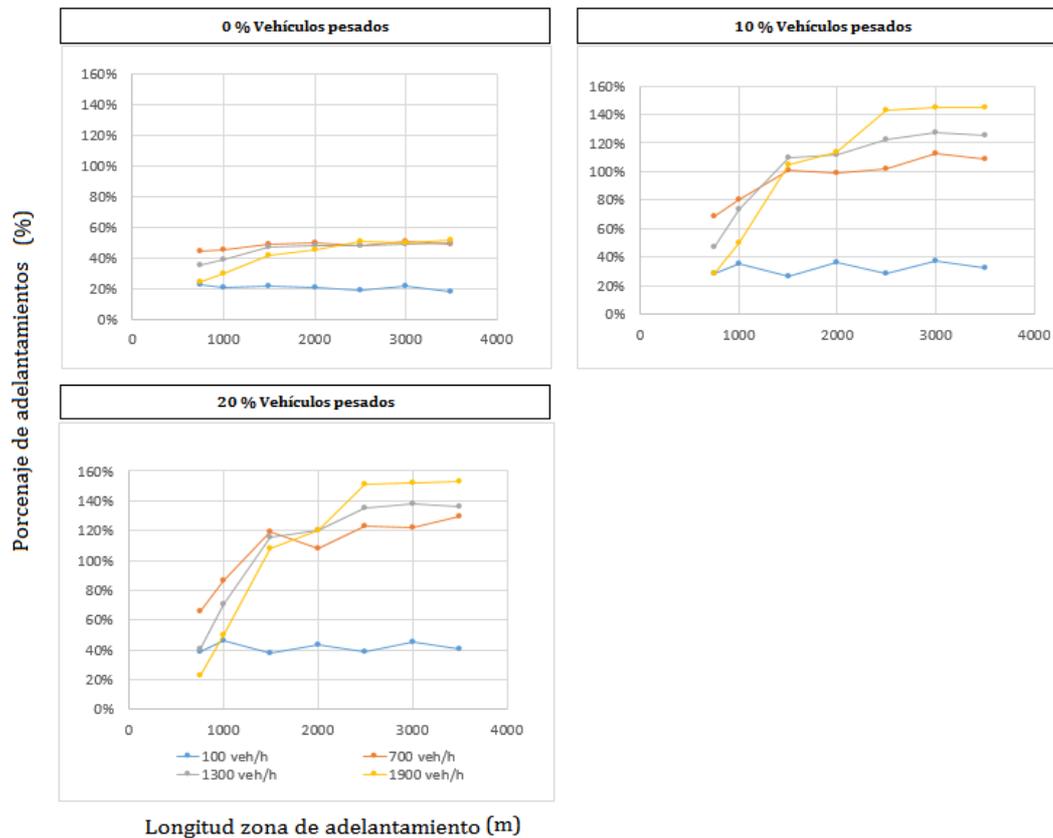


Figura 27. Porcentaje de adelantamientos según escenarios e intensidades de tráfico.

A simple vista se aprecia como con un aumento de la intensidad de tráfico se produce un mayor porcentaje de adelantamientos.

Si ahora se analiza el porcentaje de adelantamientos en función de la presencia de vehículos pesados, se observa claramente que cuando el porcentaje de vehículos pesados es mayor, hay más adelantamientos, puesto que, los vehículos pesados suponen un obstáculo a la circulación en flujo libre para los vehículos ligeros, y por este motivo, con el fin de mejorar la fluidez en la circulación, se realizan adelantamientos a los vehículos más lentos.

Aparecen mayores diferencias entre los casos de 0% de vehículos pesados con respecto a un 10% o un 20% de vehículos pesados, mientras que para estos dos últimos porcentajes las diferencias entre ellos no son significativas. De modo que, la mayor sensibilidad se produce cuando aparecen vehículos pesados, pero una vez aumentan tanto los vehículos ligeros como los pesados, no hay un incremento excesivo en los adelantamientos. Es decir, el caso de una intensidad de 1900 veh/h tiene un porcentaje de adelantamientos muy similar para el caso de 10 y 20% de vehículos pesados, se presentan mayores diferencias respecto al caso de 0% de vehículos pesados, donde el porcentaje de adelantamientos es más bajo.

Otro aspecto fundamental a considerar en el porcentaje de adelantamientos es la influencia de la longitud de la zona de adelantamiento. Esto se va a comentar según el caso de intensidad:

- Cuando la intensidad de tráfico es de 100 veh/h y para los tres casos de porcentajes de vehículos pesados, a medida que la longitud de la zona de adelantamiento va variando, el porcentaje de adelantamientos no aumenta, sino que permanece prácticamente constante en todos los escenarios y, además, cuando hay presencia de vehículos pesados en un 10%, aumenta alrededor de un 10% el porcentaje de adelantamientos respecto al caso anterior.

De este caso se extrae que, cuando la intensidad de tráfico es baja, no interesan longitudes de adelantamiento largas, puesto que no favorecen a la funcionalidad, ya que los adelantamientos se producen al principio del tramo, y en carreteras con bajas intensidades de tráfico los conductores no tienen el deseo de adelantar, pues circulan sin obstáculos.

- Para una intensidad de 700 veh/h se aprecian porcentajes de adelantamiento mayores, debido a que ya hay un mayor número de vehículos en circulación. Asimismo, aparecen diferencias respecto al caso de 0% de vehículos pesados con los otros dos casos de porcentajes de pesados estudiados, puesto que cuando no hay pesados, se producen más adelantamientos que para intensidad de 100 veh/h, pero no hay grandes diferencias con el resto de escenarios, mientras que, cuando los pesados están presentes en un 10-20%, los adelantamientos pasan a ser de alrededor al 100% cuando la longitud de adelantamiento es igual o superior a 1500 m. Lo que indica que un mismo vehículo puede llegar a adelantar en más de una ocasión. En este caso se comienzan a apreciar mejoras

en la funcionalidad de tráfico cuando las longitudes de adelantamiento son mayores.

- El tercer caso de intensidad, 1300 veh/h, presenta un comportamiento similar al anterior, pero con líneas más acusadas. Se puede apreciar que, para longitudes de adelantamiento inferiores a 1500 m, se producen menos adelantamientos que para intensidades menores. Esto ocurre tanto en presencia o no de vehículos pesados, lo cual viene a señalar que zonas de adelantamiento inferiores a 1500 m cuando la intensidad es media-alta no es funcional para el tráfico, pues no mejoran el nivel de servicio.
- Por último, la intensidad de 1900 veh/h, presenta más limitaciones que el caso anterior. Por ejemplo, si la longitud de adelantamiento es inferior a 1500 m, los adelantamientos que tienen lugar para este caso de intensidad de tráfico son prácticamente inferiores a los que se producen en el resto de casos. Esto resulta llamativo puesto que por intuición cabe pensar que, a mayor número de vehículos, mayor número de adelantamientos, pero para estas situaciones no se da este comportamiento. Por lo tanto, se concluye que, para elevadas intensidades de tráfico, longitudes de adelantamiento cortas o medias no son beneficiosas, puesto que no se producen mejoras en el flujo de tráfico.

De los puntos analizados, se puede afirmar que cuando las intensidades son bajas, 100 veh/h e inferiores a 700 veh/h, no son necesarias longitudes de adelantamiento largas, porque no se aumenta el porcentaje de adelantamientos, aunque la longitud de adelantamiento sea mayor.

Mientras que, cuando la intensidad de tráfico supere los 700 veh/h interesarán longitudes iguales a 1500 m aproximadamente. Por otro lado, en presencia de pesados la estabilidad se alcanza a mayores longitudes, para estos casos favorecen longitudes comprendidas entre 1500-2000 m. Para intensidades de 1300-1900 veh/h se observan porcentajes de adelantamiento similares cuando la longitud de adelantamiento es igual o superior a 2500 m.

Porcentaje de vehículos en cola

A falta de una normativa propia, en España se utiliza la metodología del HCM 2010 para la estimación de los niveles de servicio (Ministerio de Fomento, 2016).

Como se ha mencionado al principio del apartado de análisis, una de las medidas de desempeño que se evalúan para este caso de estudio es el porcentaje de vehículos en cola (PF): porcentaje de vehículos que circulan en seguimiento respecto al total de vehículos. El intervalo que determina si un vehículo circula en seguimiento se ha basado en el establecido en el HCM 2010, 3 segundos. Los resultados para esta variable se han obtenido en los puntos kilométricos medios de cada sección de adelantamiento y no-

adelantamiento a lo largo de la carretera, donde quedan colocados los detectores en el programa informático Aimsun.

Gracias a la disposición de esta herramienta se generan archivos con formato .txt donde los datos de salida correspondientes a cada detector son:

- Identificación de vehículos.
- Tiempo de paso.
- Velocidad de paso.
- Velocidad deseada.

En las Figuras 28, 29 y 30 se recogen los resultados que presentan los ocho escenarios simulados según los volúmenes de tráfico direccionales y los tres porcentajes de vehículos pesados estudiados.

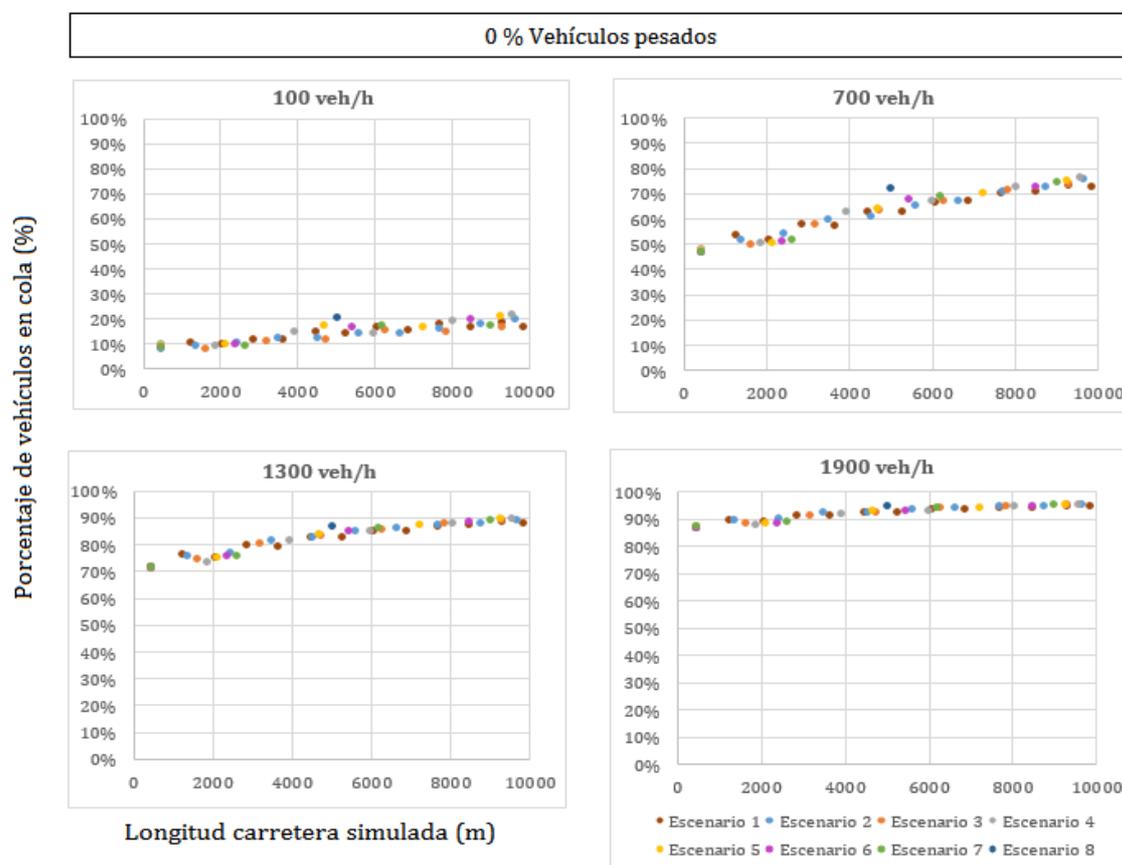


Figura 28. Porcentaje de vehículos en cola (PF), 0% HV*.

*HV= Vehículos pesados

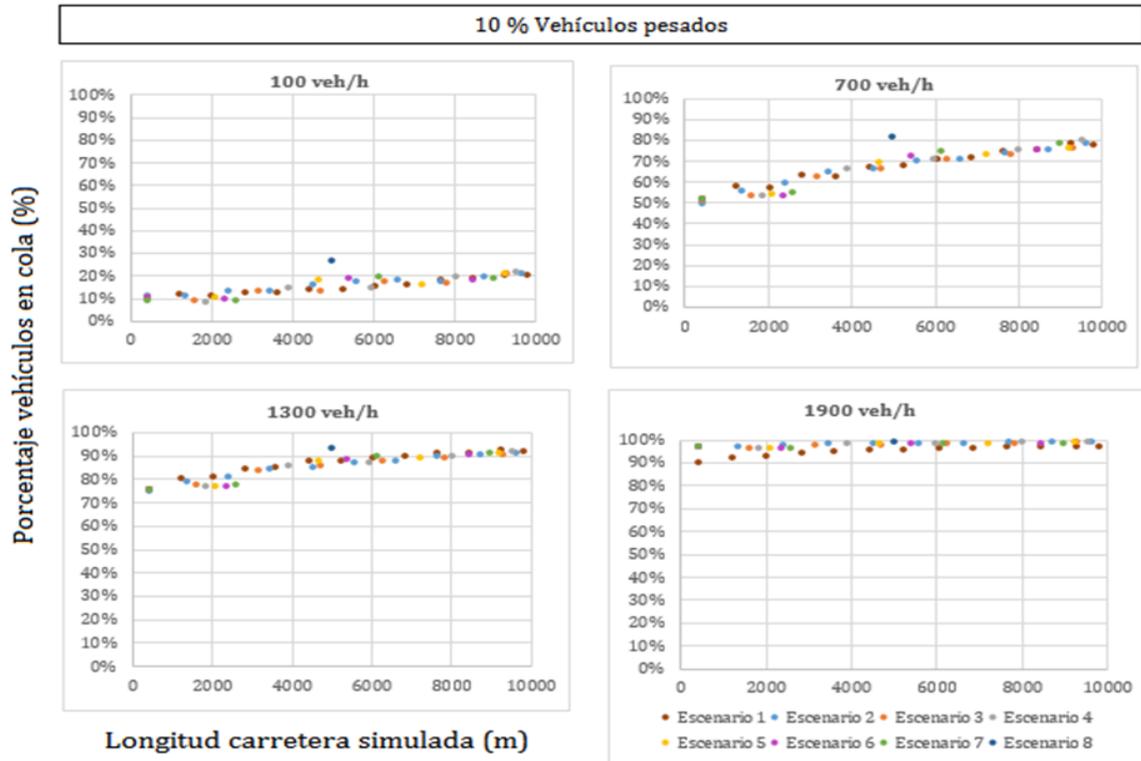


Figura 29. Porcentaje de vehículos en cola (PF), 10% HV.

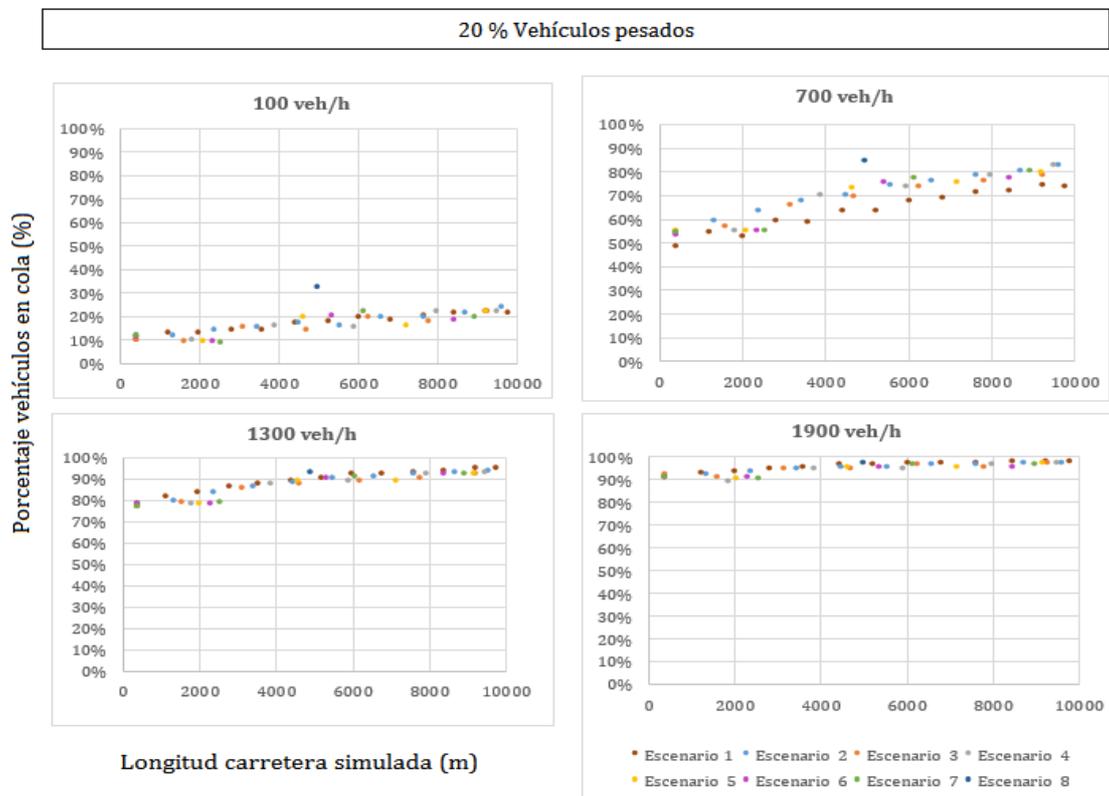


Figura 30. Porcentaje de vehículos en cola (PF), 20% HV.

En las Figuras 28, 29 y 30 se ha representado el porcentaje de vehículos en cola para los cuatro casos de intensidades de tráfico y porcentajes de vehículos pesados de 0%, 10% y 20% respectivamente. En ellas se puede observar el crecimiento progresivo del porcentaje de vehículos en cola a lo largo del tramo de carretera simulado, y ocurre lo mismo en los ocho escenarios simulados; al final del tramo, el porcentaje de tiempo en cola alcanza el máximo.

Además, conforme aumenta la intensidad, el porcentaje de vehículos en cola es mayor. Este resultado es el esperado porque a menor cantidad de vehículos en la carretera simulada, menor será el tráfico, y, por consiguiente, se formarán menos colas.

En los gráficos representados no se aprecian grandes diferencias entre las ocho configuraciones de escenarios planteados. No se puede afirmar de antemano cuál de ellos presenta ventajas sobre los otros. Pero lo que sí se observa, es que cuando las intensidades son muy bajas en todos los escenarios el porcentaje de vehículos en cola es bajo, y muy similar entre los ocho escenarios. Lo mismo ocurre en el caso extremo, cuando la intensidad es muy alta, la tendencia general de los escenarios es la misma, en todos ellos aumenta el porcentaje de vehículos en cola progresivamente hasta el final del tramo. Esto tiene sentido, puesto que para intensidades muy bajas (100 veh/h) no habrá alto porcentaje de vehículos en cola, mientras que, cuando la intensidad sea muy alta (1900 veh/h) todos los vehículos estarán en cola.

Lo anterior puede resumirse gráficamente:

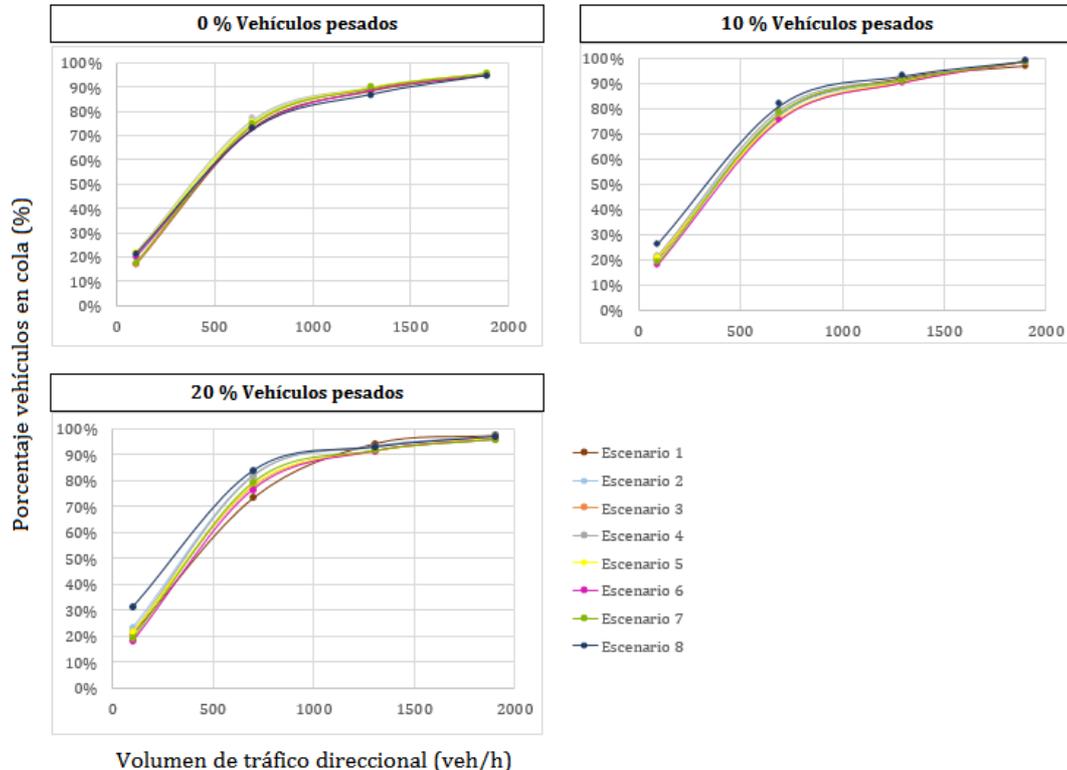


Figura 31. Porcentaje de vehículos en cola de cada escenario respecto al volumen direccional de tráfico.

Cabe señalar que en la Figura 31, el porcentaje de vehículos en cola presenta la misma forma funcional que el porcentaje de tiempo en cola presentado en la Figura 32, según establece el Manual de Capacidad:

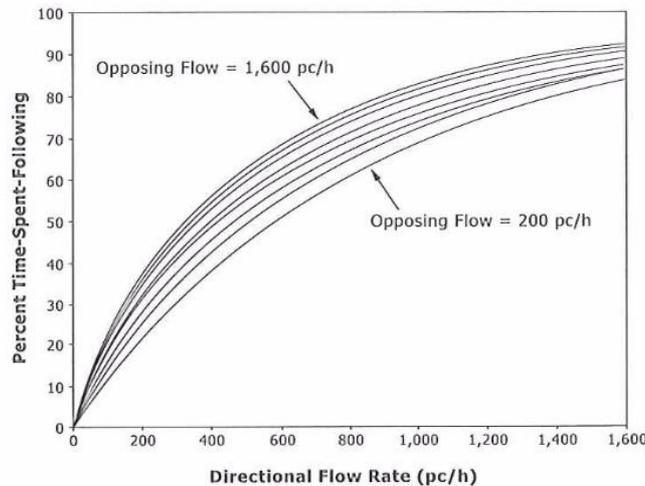


Figura 32. Porcentaje de tiempo cola. Fuente: HCM 2010.

Lo que claramente se puede observar del análisis del porcentaje de vehículos en cola es que no afecta el escenario, es decir, la longitud de zona de adelantamiento y sí la intensidad de tráfico.

Asimismo, cuando el porcentaje de vehículos pesados aumenta, comienza a haber cierta dispersión en los resultados. De este modo, se plantean algunas interpretaciones prestando especial atención al porcentaje de vehículos pesados en base a las Figuras 28, 29, 30 y 31:

- En primer lugar, cuando se cuenta con un 0% de vehículos pesados e intensidades muy bajas o bajas, todos los escenarios presentan un porcentaje de vehículos en cola similar. Por lo tanto, aquellos escenarios con mayores longitudes de adelantamiento no ofrecen ventajas a la funcionalidad del tráfico. Es por ello, que los escenarios 1, 2 y 3, con longitudes de adelantamiento de 750, 1000 y 1500 m respectivamente son las que presentan el porcentaje de vehículos en cola ligeramente más bajo al final del tramo de carretera de 10 km.

Ante 0% de vehículos pesados e intensidades altas o muy altas ocurre algo similar, al final del tramo el porcentaje al que se llega en todos los escenarios es prácticamente del mismo valor, y no longitudes de adelantamiento mayores favorecen, sino que con los escenarios 1, 2, 3 mencionados anteriormente se tendría igual funcionalidad que con aquellos de mayores longitudes del tramo de adelantamiento.

- En segundo lugar, donde el porcentaje de vehículos pesados es del 10%, si las intensidades son muy bajas o bajas se observa cierta dispersión entre escenarios, donde claramente el 8 es el peor. Y escenarios como el 4, 5 y 6 dan valores ligeramente más bajos de porcentaje de vehículos en cola.

Ahora bien, si las intensidades son altas o muy altas, prácticamente el 100% de los vehículos está en cola en todos los escenarios. Ligeramente, escenarios como el 1 han resultado producir porcentajes de vehículos en cola por debajo a aquellos que cuentan con mayor longitud de adelantamiento.

- En tercer lugar, el caso de un 20% de vehículos pesados refleja que cuando las intensidades de tráfico son muy bajas o bajas el mejor escenario es el 1, porque al final del tramo dista alrededor de un 10% menos de porcentaje de vehículos en cola respecto a otros escenarios como podría ser el 2.

Por otro lado, en esta ocasión y ante intensidades altas o muy altas, escenarios como el 2, 3, 4, 5, 6 y 7 ofrecen menores porcentajes de vehículos en cola con respecto al escenario 1. Esto indica que no serían necesarias longitudes de adelantamiento de 3500 m como sería el caso del escenario 7 pero sí podrían considerarse longitudes iguales o superiores a 1000 m para mejorar el nivel de servicio de la vía.

Velocidad puntual de los vehículos

En primer lugar, se han analizado las velocidades puntuales medias temporales de cada vehículo de las 15 replicaciones para cada escenario, intensidad de tráfico y porcentaje de vehículos pesados.

Las diferencias entre velocidades puntuales medias temporales se presentan a lo largo del tramo de carretera principalmente por la presencia de las zonas de carril de adelantamiento, donde se producen ligeros aumentos de la velocidad cuando los coches entran en una sección 2+1 para realizar las maniobras de adelantamiento.

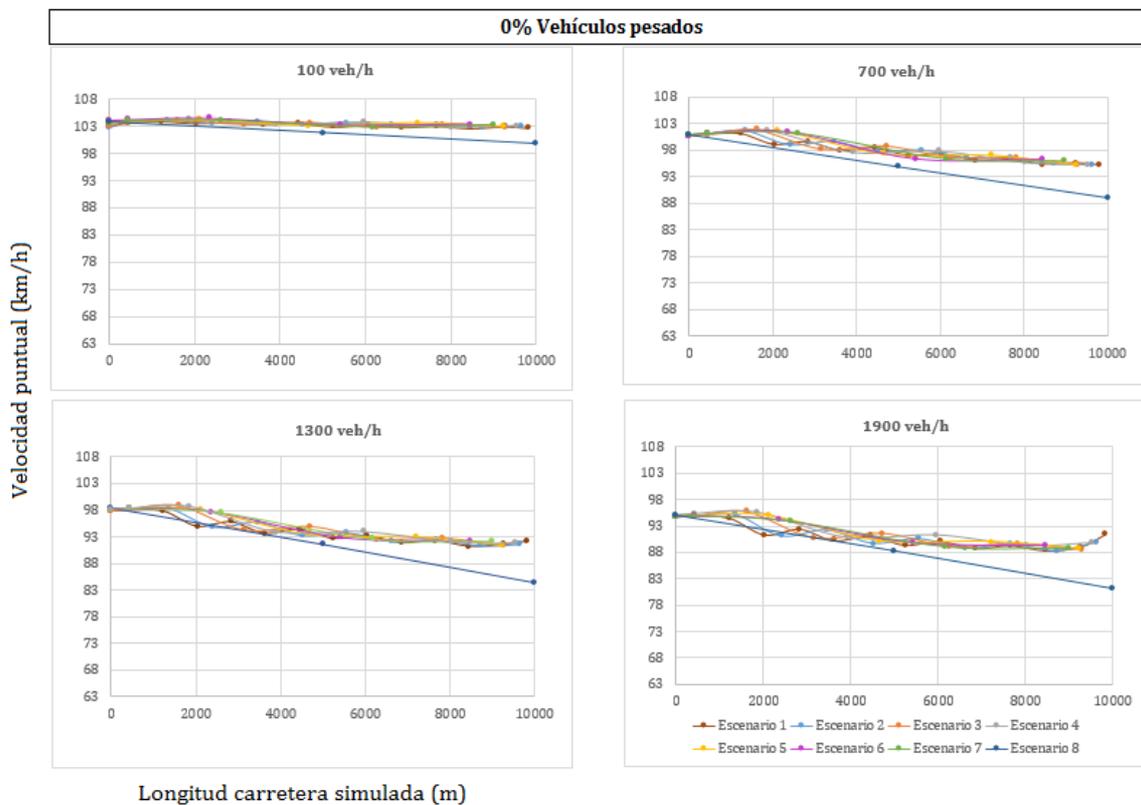


Figura 33. Velocidad puntual media temporal a lo largo de la carretera, 0% HV.

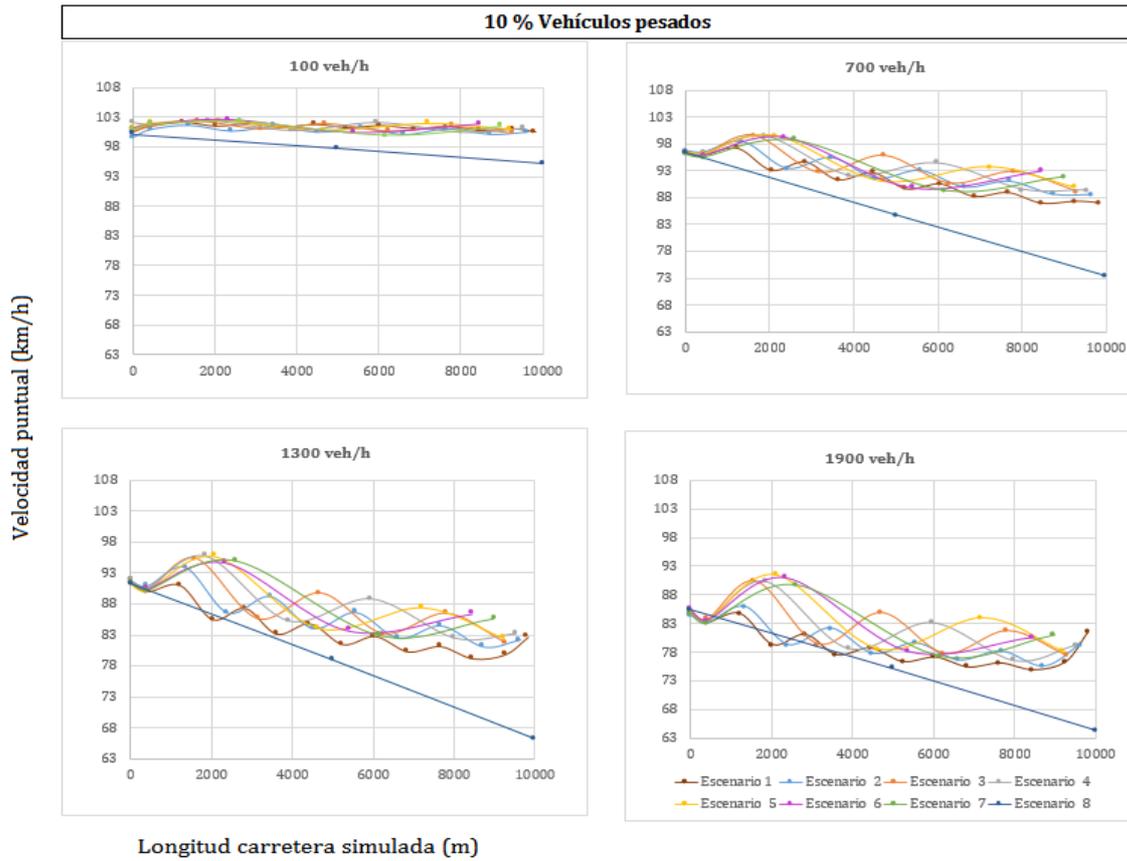


Figura 34. Velocidad puntual media temporal a lo largo de la carretera, 10% HV.

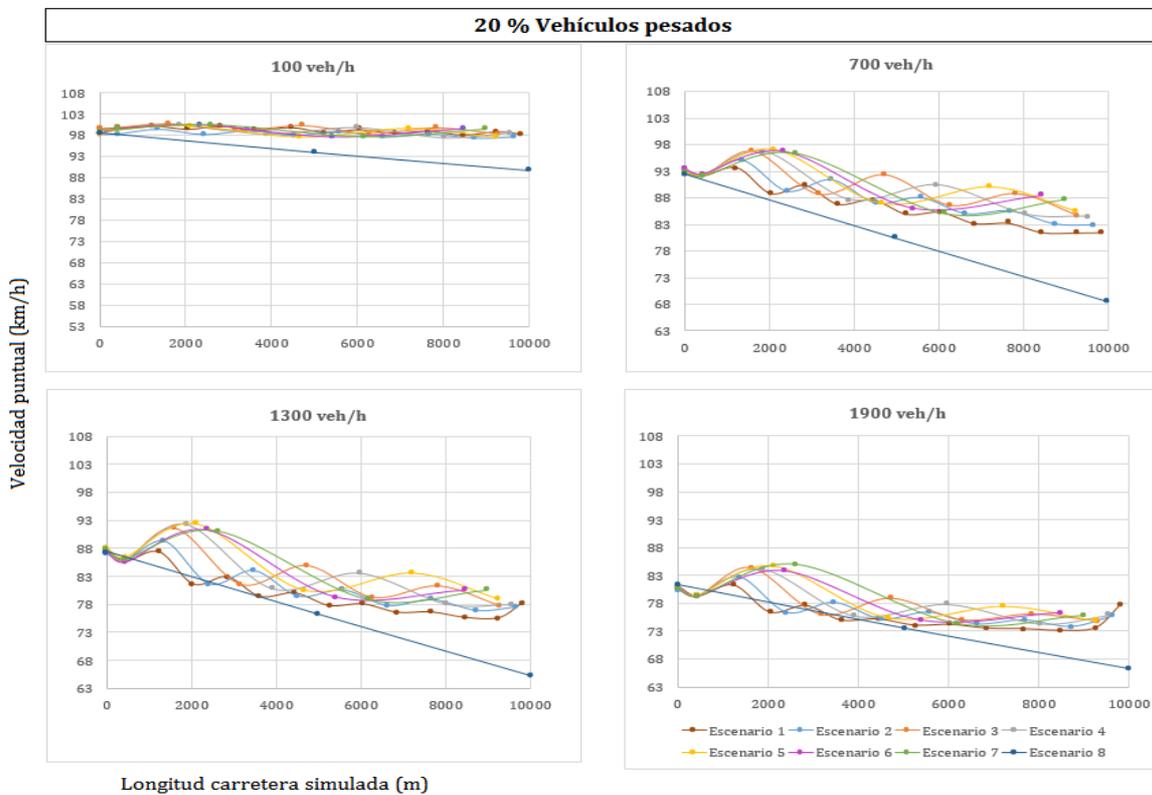


Figura 35. Velocidad puntual media temporal a lo largo de la carretera, 20% HV.

En las gráficas de las Figuras 33, 34 y 35 se observa la influencia de la sección 2+1 en la velocidad de los vehículos. Cuando los coches entran en la sección 2+1 se produce un leve aumento de la velocidad, que cuando salen de ella, disminuye porque entran en una zona de no-adelantamiento.

En todos los escenarios se produce una disminución progresiva de la velocidad hasta el final de la carretera que resulta más brusca en el escenario donde no está permitido el adelantamiento en todo el tramo.

Por otro lado, cabe señalar que en aquellos casos donde la intensidad es baja, la velocidad se mantiene alrededor de la velocidad de proyecto, 100 km/h, y a medida que aumenta la intensidad de tráfico va disminuyendo a valores de velocidad más bajos. El descenso que se produce entre los casos extremos de intensidades (100 y 1900 veh/h) cuando no hay vehículos pesados es de en torno 5 km/h para todos los escenarios estudiados. Pero en el caso donde no hay vehículos pesados, se observa que todos los escenarios mantienen una velocidad similar entre sí.

Sin embargo, el aumento del porcentaje de vehículos pesados a un 10% provoca una disminución de la velocidad puntual media en todo el tramo respecto al caso de 0% de vehículos pesados. Para intensidades muy bajas o bajas tal disminución ronda unos 2 km/h mientras que, cuando la intensidad es alta o muy alta ya es más notable, de unos 8 km/h. Lo que indica que la presencia de vehículos pesados influye en el descenso de la velocidad, así como el mayor número de tráfico.

En los casos en los que se han introducido un 20% de vehículos pesados las velocidades vuelven a ser semejantes entre escenarios pues tales vehículos ralentizan a los ligeros. Por lo que, en el caso de intensidad de 1900 veh/h en las últimas zonas del tramo las velocidades rondan valores parecidos porque los vehículos pesados y ligeros llevan más o menos la misma velocidad. Concretamente para el escenario 1 de este caso, no se aprecian las oscilaciones porque en este escenario los adelantamientos son muy bajos y prácticamente el 100% de los vehículos están en cola.

Para observar con precisión los cambios de velocidad de los vehículos a su paso por las zonas de adelantamiento y no-adelantamiento de la carretera, se presenta el ejemplo para la intensidad de tráfico de 700 veh/h y 10% de vehículos pesados en los escenarios 1 y 4 donde se verifique que en las zonas de adelantamiento la velocidad aumenta, y se producen unas oscilaciones entre los tramos de adelantamiento y no-adelantamiento.

Escenario 1

856 ← → 750

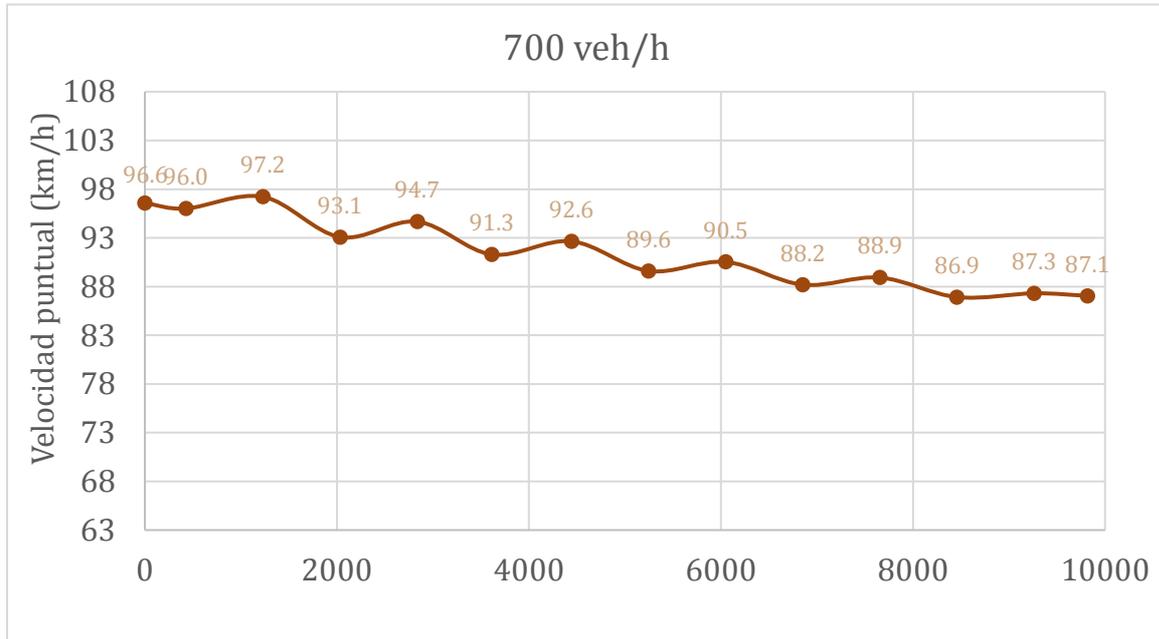


Figura 36. Velocidades puntuales detalladas en Escenario 1.

Escenario 4

856 ← → 2000 ← → 2106

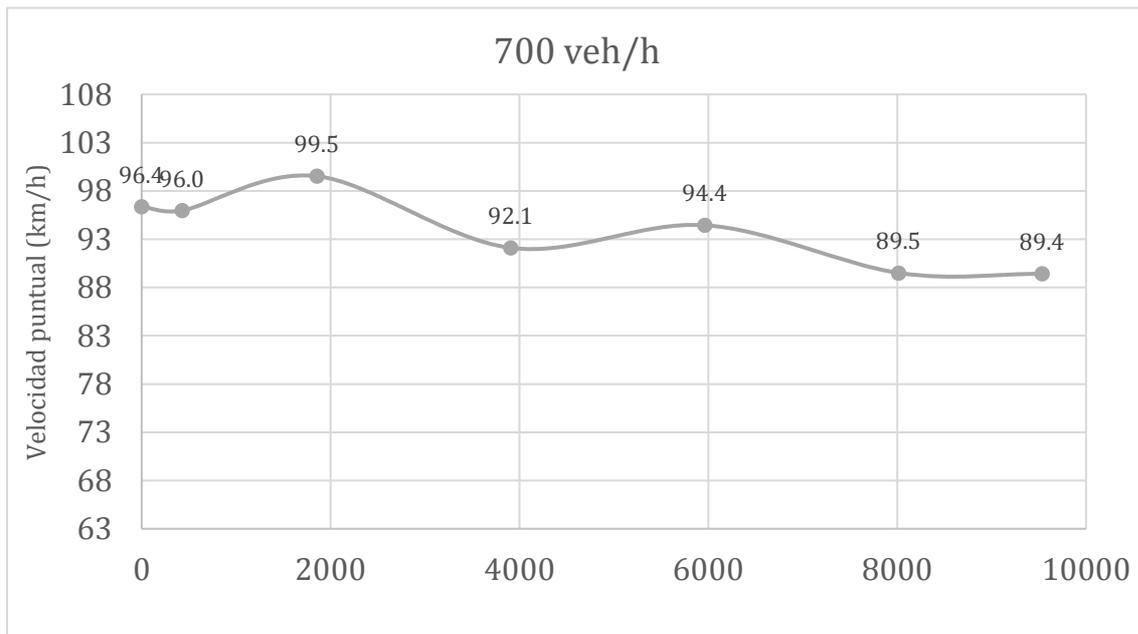


Figura 37. Velocidades puntuales detalladas en Escenario 4.

Los dos ejemplos recogidos en las Figuras 36 y 37 reflejan el comportamiento esperado de los vehículos cuando entran a la sección 2+1. Estas variaciones de velocidad a lo largo del tramo simulado son malas, casi siempre, para todo. No es deseable que haya cambios en la velocidad durante el trayecto por la comodidad del conductor. El escenario 1, por ejemplo, presenta más oscilaciones que el escenario 4, por lo que, ante estos resultados, interesarían escenarios del tipo 4 para así mantener oscilaciones menos frecuentes y con amplitud más amplia.

En resumen, existencia de zonas de adelantamiento largas, provocan un cambio de velocidad progresivo, en cambio, en los casos donde las zonas son cortas o medias, también se produce el descenso progresivo, pero con oscilaciones más frecuentes, lo que influye en el modo de conducir del conductor. Por este motivo, en aquellos casos donde las intensidades de tráfico son significativas, se preferirán zonas de adelantamiento de 1500 o de 2000 m frente las de 750 m, para evitar que los conductores cambien de velocidad con asiduidad.

Velocidad media de los escenarios

El estudio de la medida de desempeño de la ATS, Average Travel Speed (km/h), muestra la velocidad media espacial de cada escenario planteado. Con esta medida se busca tener una idea de la eficacia de cada escenario para determinar qué longitud de adelantamiento es la óptima.

En primer lugar, se ha analizado la velocidad media de las ocho configuraciones de escenarios en función de la intensidad de tráfico y posteriormente, Figura 39, en función de la longitud de zona de adelantamiento. Para ello, el programa informático Aimsun ofrece resultados de velocidad media por escenario cada 15 minutos. Se ha obtenido la media para cada sección de las quince replicaciones realizadas y los resultados se recogen en la Figura 38.

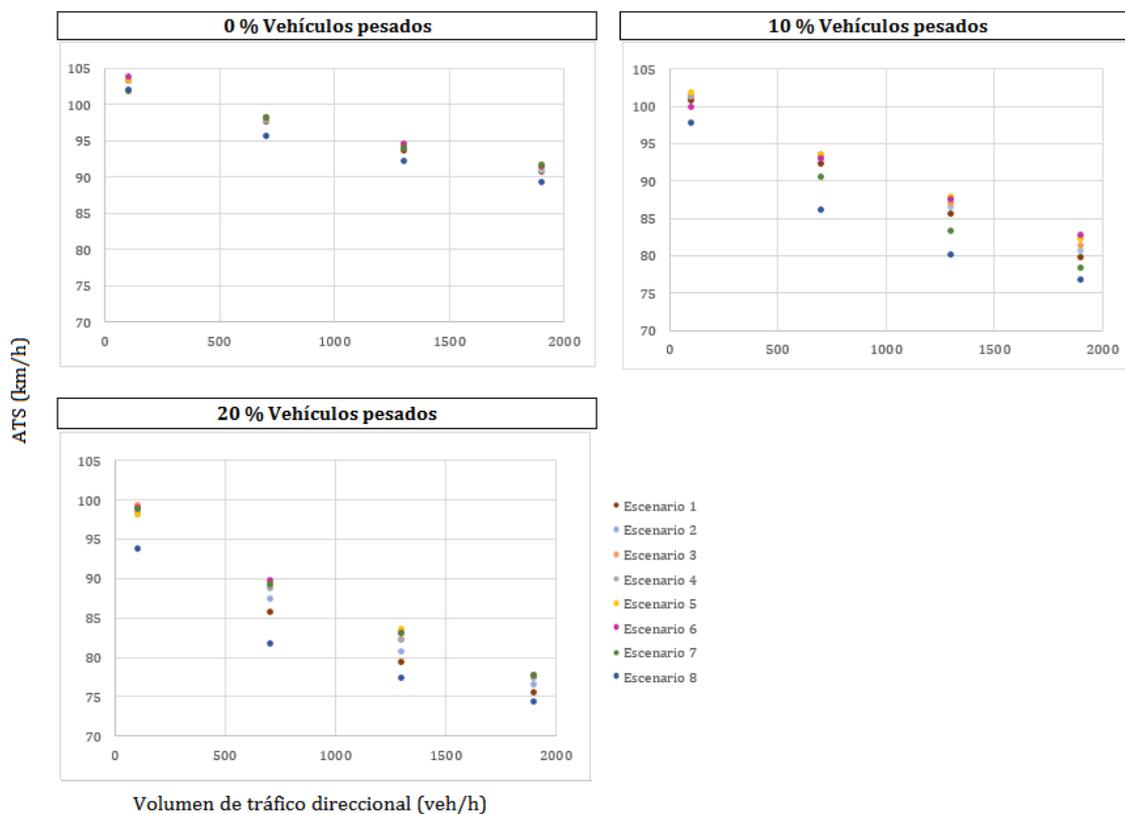


Figura 38. ATS (km/h) frente volumen de tráfico (veh/h).

La Figura 38 recoge los datos de velocidad media espacial, mediante la que se pretende evaluar la funcionalidad de los escenarios estudiados en este Trabajo Final de Máster.

A la vista de los resultados se comentan los siguientes aspectos:

- En aquellas simulaciones donde no hay vehículos pesados, la velocidad media de los escenarios se mantiene en un rango de valores muy semejante. Se aprecian ciertas diferencias con el escenario 8 puesto que no cuenta con zonas de adelantamiento, por lo que, la velocidad media es menor, lo cual tiene sentido.

Otro aspecto que se percibe a simple vista es que, de manera esperada, conforme la intensidad de tráfico es mayor, la velocidad media de las secciones disminuye. De este modo, se ve claramente que la funcionalidad de la carretera baja cuando las intensidades de tráfico son altas.

- El segundo caso representado cuenta con un 10% de vehículos pesados, debido a la presencia de estos, la velocidad media de la sección baja, ya que, a diferencia del caso anterior los vehículos ligeros circulaban sin obstáculos, mientras que ahora, los vehículos lentos ocasionan descensos en la velocidad media del tramo.

Se vuelve a cumplir que en el escenario 8 los vehículos circulan más lentos. Al contrario de lo que muestran el resto de escenarios que permiten el adelantamiento.

Se pasa a analizar por intensidades, y se observa la sensibilidad de la velocidad media cuando la intensidad aumenta. A mayor intensidad de tráfico, menor velocidad media de la sección.

- El tercer caso presentado considera un 20% de vehículos pesados. En esta situación se aprecian mayores diferencias entre las velocidades medias de los escenarios. Al igual que en los casos anteriores, con intensidades bajas no hay beneficios de unos escenarios sobre otros. Pero a medida que se evalúan intensidades mayores sí se aprecian diferencias. Por lo que, cuando se tienen intensidades de 700 veh/h los escenarios con mejor velocidad media por tramo son el 3, 4, 5, 6 y 7. Y lo mismo ocurre con intensidades de 1300 y 1900 veh/h.

A continuación, se recoge la velocidad media espacial por longitud de zona de adelantamiento. Se ha representado la evolución de la velocidad media de los escenarios según el caso de intensidades y para cada porcentaje de vehículos pesados con el fin de encontrar la longitud a la que la velocidad media se estabilice y poder determinar una longitud óptima para el carril de adelantamiento.

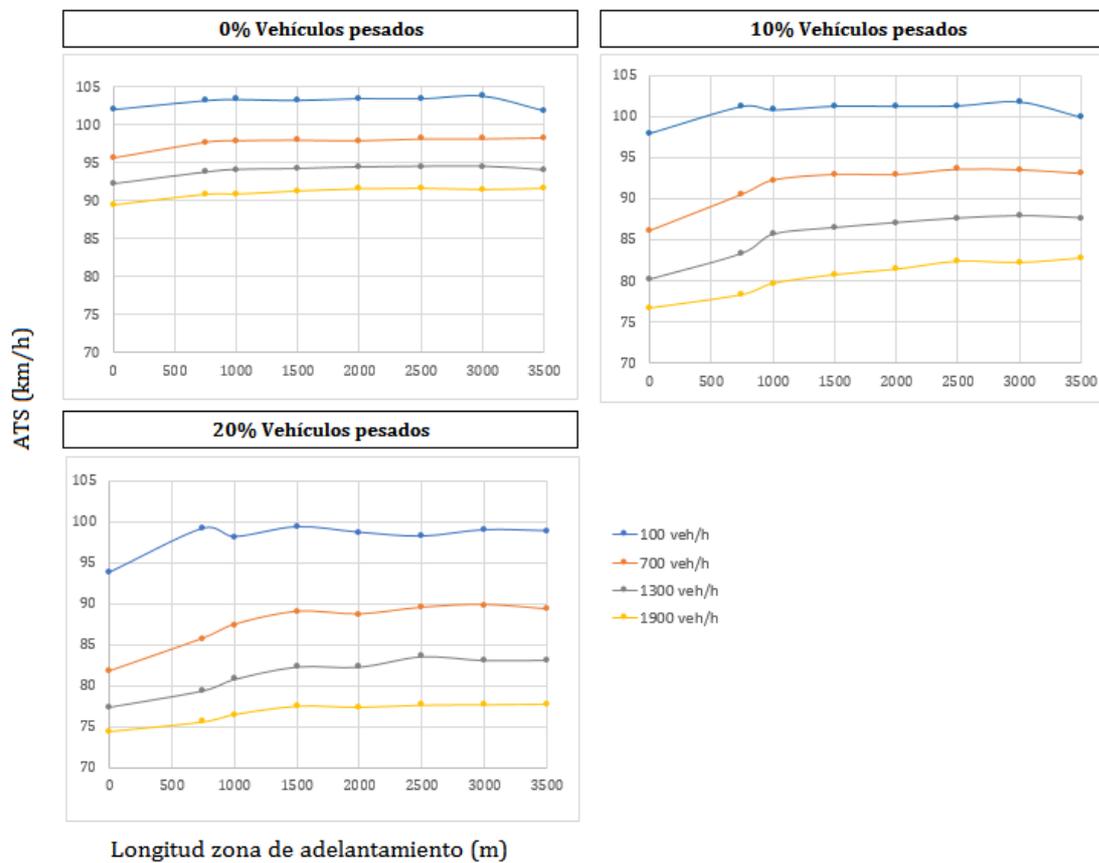


Figura 39. Velocidad media de la sección, ATS (km/h).

En la Figura 39 se ha representado: en el primer gráfico situado a arriba a la izquierda la velocidad media de cada escenario cuando no hay vehículos pesados. Se observa que la velocidad media más baja se da para el caso de 1900 veh/h, puesto que el nivel tráfico es mucho mayor.

Caso contrario es el de intensidad de tráfico de 100 veh/h, donde la velocidad media es mayor. En esta gráfica se observa la influencia por el aumento de tráfico. A mayor intensidad de tráfico, menor velocidad. La tendencia en esta ocasión se estabiliza a partir de una longitud de adelantamiento de 750 m.

La gráfica situada arriba a la derecha representa lo mismo que la comentada en párrafos anteriores, la diferencia es que ahora un 10% de los vehículos introducidos son vehículos pesados. De nuevo, a mayor intensidad de tráfico, la velocidad media del tramo es menor, aunque en este caso, los valores de velocidad media son más bajos puesto que la presencia de vehículos pesados obstaculiza el flujo libre de los vehículos ligeros. En esta situación se alcanza una estabilidad de la velocidad a partir de una longitud de adelantamiento de 1000 m, a partir de esta longitud, los escenarios con longitudes mayores

no presentan velocidades medias mayores, sino que se mantienen relativamente estables. Cabe señalar que se aprecia un ligero aumento de la velocidad cuando el escenario cuenta con una longitud de adelantamiento 1500 m y la intensidad de tráfico es de 1900 veh/h.

La tercera gráfica que se recoge en la Figura 39, abajo a la izquierda, indica la velocidad media cuando hay un 20% de vehículos pesados. Presenta el mismo comportamiento que la segunda, ya comentada, donde la influencia de los vehículos pesados acusa a la velocidad media, disminuyéndola, respecto al caso anterior alrededor de 4 km/h. En esta situación, la longitud a partir de la cual se estabiliza la velocidad media es igual o superior a 1500 m.

Evaluada la velocidad media espacial, se puede afirmar que depende directamente de la intensidad de tráfico y del porcentaje de vehículos pesados, aunque en menor medida. Por lo que, ambos aspectos influyen a la hora de determinar el valor de longitud óptima del carril de adelantamiento.

Conclusiones del análisis

Criterios de diseño de carriles de adelantamiento en carreteras 2+1

A partir del análisis funcional de los escenarios de carretera estudiados mediante microsimulación, se pueden establecer criterios de diseño a adoptar en futuros casos donde sea adecuada la disposición de un tramo de carretera 2+1.

En estos criterios se considera una carretera 2+1 completamente simétrica, es decir, con alternancia de las secciones de adelantamiento y distribuidas de forma uniforme. Este será el caso ideal desde el punto de vista de la funcionalidad del tráfico en ambos sentidos.

Estos criterios buscan mejorar la funcionalidad de la vía para disponer la longitud óptima del carril de adelantamiento, asumiendo que longitudes muy cortas no permiten que los vehículos rápidos adelanten y longitudes muy largas dejan de ser efectivas, en tanto que todos los vehículos que pueden adelantar ya lo han hecho. También, cuando se disponen longitudes reducidas, en el sentido opuesto los tramos de no adelantamiento tienen un menor impacto en la formación de colas que los tramos de mayor longitud. Teniendo en cuenta lo anterior, en primer lugar, se mencionarán los criterios derivados de considerar cada una de las variables estudiadas, para posteriormente resumir todas ellas y escoger los valores óptimos:

- **Porcentaje de adelantamientos:** se establecen criterios diferentes según el nivel de tráfico y el porcentaje de vehículos pesados.
 - i. Ante una intensidad de tráfico muy baja, no interesan longitudes de adelantamiento largas puesto que no presentan mejoras en la funcionalidad. Para este caso, el porcentaje de vehículos pesados no influye en gran medida en los adelantamientos, una longitud de 750 m sería suficiente.
 - ii. Cuando la intensidad es de 700 veh/h y aumenta el porcentaje de vehículos pesados, los cuales sí afectan al flujo de tráfico, con longitudes iguales o superiores a 1500 m se aprecia un aumento del porcentaje de adelantamientos, lo que influirá en la mejora de la funcionalidad de tráfico.
 - iii. De manera similar ocurre cuando la intensidad es de 1300 veh/h, si la longitud de adelantamiento es igual o superior a 1500 m aumentan los adelantamientos, y la estabilidad se alcanza cuando la longitud es de 2500 m en el caso de 10% y 20% de vehículos pesados.
 - iv. El caso más alto de intensidad de tráfico estudiado, 1900 veh/h, presenta mayor porcentaje de adelantamientos cuando se consideran longitudes

iguales o superiores a 2500 m; para este caso de intensidad se descartan valores de longitud menores a 1500 m porque no presentan beneficios para los adelantamientos.

- Porcentaje de vehículos en cola: del análisis se concluye que los escenarios presentan resultados similares, esta variable no se ve afectada por el tipo de escenario, pero sí por el nivel tráfico existente.
 - i. El comportamiento del porcentaje de vehículos en cola obtenido tiene la misma forma funcional que el porcentaje de tiempo en cola que propone el HCM 2010, donde la tendencia se estabiliza aproximadamente al 100% y no hay diferencias significativas entre las líneas resultantes para cada escenario, sino que son prácticamente coincidentes.
 - ii. En vista que los escenarios no afectan al porcentaje de vehículos en cola, serán convenientes aquellos que, obteniendo mismo porcentaje de tiempo en cola, la longitud de la zona de adelantamiento sea lo más óptima posible de acuerdo al resto de criterios.

- Velocidad puntual: la presencia de carriles de adelantamiento provoca variaciones de velocidad puntual de los vehículos. Para conseguir una vía funcional interesa que las velocidades sean relativamente elevadas y uniformes, es decir, que variaciones de velocidad sean lo más leves posibles para no perjudicar la conducción.
 - i. Los vehículos pesados provocan un descenso global de la velocidad.
 - ii. El aumento del nivel de tráfico genera disminución en la velocidad puntual.
 - iii. Interesan longitudes de adelantamiento de 1500-2000 m para que no se produzcan cambios de velocidad no deseados. Las zonas muy largas dan cambios de velocidad muy amplios (amplitudes mayores a 10 km/h) mientras que las zonas cortas dan cambios más frecuentes (con “longitudes de onda” iguales a las distancias entre tramos).

- ATS: velocidad media de recorrido en las secciones estudiadas.
 - i. A mayores intensidades de tráfico, menor velocidad media de la sección, y, por tanto, menor funcionalidad de la carretera.
 - ii. Ante casos de intensidades de 100, 700, 1300 y 1900 veh/h y 0% de vehículos pesados se alcanza una estabilidad de la velocidad media para longitudes de la zona de adelantamiento iguales o superiores a 750 m.

- iii. Para intensidades de 100, 700, 1300 veh/h y 10% de vehículos pesados la estabilidad de la velocidad media se consigue a partir de longitudes de la zona de adelantamiento iguales o superiores a 1000 m. Para 1900 veh/h y 10% de pesados se estabiliza para 1500 m.
- iv. Un aumento del porcentaje de vehículos pesados al 20% presenta que, para las cuatro intensidades evaluadas, 100, 700, 1300 y 1900 veh/h, la longitud de la zona de adelantamiento óptima sea igual o superior a 1000-1500 m para obtener buenos resultados de funcionalidad.

A continuación, se ha recogido lo expuesto como criterios técnicos en una tabla en la Figura 40. La tabla se ha dividido en cuatro columnas, correspondientes a las intensidades, y en tres filas, según el porcentaje de vehículos pesados. Dentro de cada caso de porcentaje de vehículos pesados (HV), hay cuatro subdivisiones, las medidas de desempeño.

Las líneas horizontales continuas en color verde indican hasta qué escenario, con una longitud de zona de adelantamiento específica, esa medida ha presentado comportamiento aceptable en el análisis realizado.

La última subdivisión, es el óptimo global, pues se ha considerado que en este rango está comprendido el valor de longitud óptima de adelantamiento. El planteamiento es el siguiente: la línea roja representa el óptimo global, se delimita cubriendo desde aquel escenario a partir del cual se cumple con todas las medidas de desempeño, hasta el escenario a partir del cual alguna medida ya no se cumple. Otro modo de verlo; el rango va desde el escenario con mayor zona de adelantamiento de los mínimos y el menor de los máximos.

En el rango del óptimo global considerado hay casos en los que se superan los 1500 m de carril de adelantamiento que la *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado (2016)* prohíbe, pero que, en este estudio se ha visto que dependiendo de la intensidad de tráfico será interesante una longitud de carril de adelantamiento determinada.

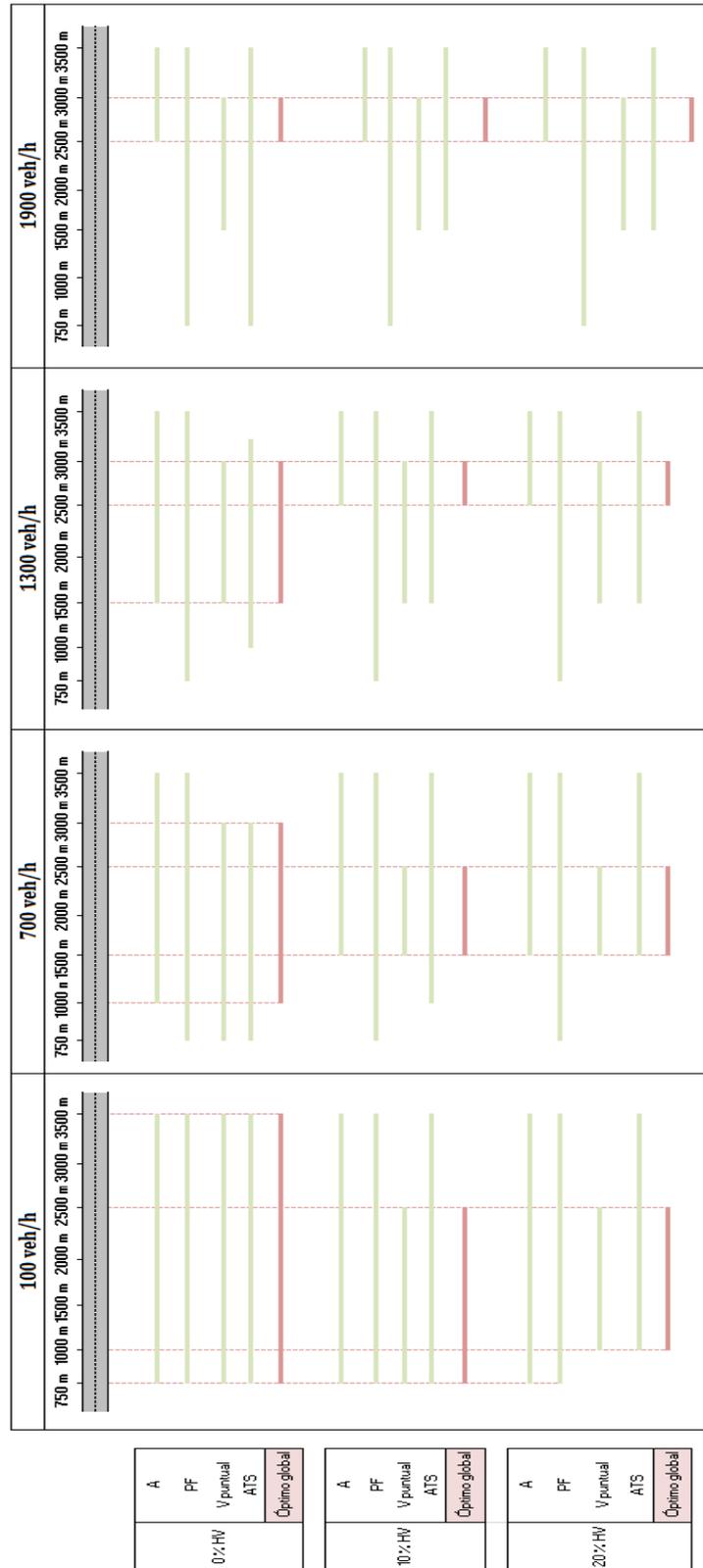


Figura 40. Criterios técnicos para determinar la longitud de zona de adelantamiento óptima en carreteras 2+1.

Por otro lado, cabe mencionar que se han considerado cuatro medidas de desempeño para evaluar la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1, mencionadas a lo largo del trabajo. A diferencia del HCM 2010 que indica que para las carreteras de tipo I, asociada dicha clasificación a las carreteras 2+1, considera que el nivel de servicio viene dado únicamente por:

- La velocidad media de recorrido, ATS.
- Porcentaje de tiempo en cola, que se puede asociar al porcentaje de vehículos en cola de esta investigación, PF.

De modo que, si se consideran estas dos medidas para determinar el valor de longitud óptima de adelantamiento para carreteras 2+1, en aquellas situaciones en las que el valor mínimo es restringido por la velocidad puntual o el porcentaje de adelantamientos, se obtendrían rangos con valores óptimos más bajos, puesto que, el porcentaje de vehículos en cola no indica beneficios claros de un escenario sobre otro, y en todos los casos el óptimo global tendría como valor mínimo el asociado a cumplir la velocidad media de recorrido, ATS.

Finalmente, determinados los criterios de diseño, se observa que la variable de tráfico más importante de la que depende la longitud de la zona de adelantamiento es la intensidad de tráfico, con pequeñas influencias del porcentaje de vehículos pesados.

A lo largo de la CV-405 la mayoría de los tramos son alineaciones rectas, de longitudes variables que se ajustan a los requisitos del terreno, unidas por curvas que en unos casos tienen una correcta coordinación con la longitud de las rectas, pero que, en otros casos, como al inicio del tramo, P.K. 4+000 aproximadamente, existe una curva con pequeño radio y puede causar molestias cuando los conductores circulan por ella.

El tramo de aproximadamente 9 km que une Torrent con Montserrat es una alineación que no presenta muchos cambios de rasante, lo que produce que los usuarios no perciban de forma notable los acuerdos cóncavos o convexos. En la imagen siguiente, Figura 42, se presenta el perfil longitudinal de la carretera que posteriormente se deberá considerar para la microsimulación de tráfico de los escenarios a considerar (escenario actual y escenario propuesto de carretera 2+1).



Figura 42. Perfil longitudinal del tramo de estudio. Fuente: Google Earth.

Las características de tráfico que presenta la carretera se recogen en la Tabla 9:

Carretera	PK	Sentido	V_T^* (veh/h)	IMD (veh/día)	% pesados
CV-405	11+500	Montserrat	520-1000	15342	4
		Torrent			

* V_T : rango de intensidad horaria total en hora punta (veh/h)

Tabla 9. Características de tráfico. Fuente: *Análisis de la funcionalidad del tráfico en carreteras convencionales*, Moreno, A. T., (2015)

Los datos de tráfico se han tomado de la Tesis Doctoral de Moreno, A. T., donde para la toma de datos experimentales se grabó en el P.K. 11+500 de la CV-405 y en hora punta.

Problemática actual

A la vista de los elevados niveles de tráfico que ha de soportar la CV-405 surge la idea de incorporar secciones 2+1 para mejorar la funcionalidad de la misma, como fin de la aplicación práctica de este estudio.

El problema de tráfico se basa fundamentalmente en tres aspectos:

- Nivel de capacidad del tramo que conecta Torrent con Montserrat, pues cuando hay una elevada concentración de vehículos la vía no puede soportar tal intensidad.
- Seguridad vial respecto a movimientos que se realizan a lo largo de la carretera cuando los usuarios desean coger desvíos o giros a izquierdas, en donde se pone en peligro la seguridad tanto del que realiza la maniobra, como la de los de su alrededor.
- Alta siniestralidad por la presencia de motos y bicicletas.

Condicionantes existentes

La idea de incorporar secciones de adelantamiento de carretera 2+1 en la CV-405 se encuentra limitada por el trazado existente, así como por las numerosas intersecciones y accesos que hay a lo largo del tramo de aplicación. Por lo que, para llevar a cabo la solución a proponer resulta de gran interés presentar una recopilación de aquellos puntos que se mantendrán intactos cuando se encajen las secciones de 2+1 en el trazado actual. En la Figura 43 se muestran los puntos que se ha optado por mantener fijos a la hora de encajar las secciones de 2+1 que posteriormente se ven detallados en fotos.

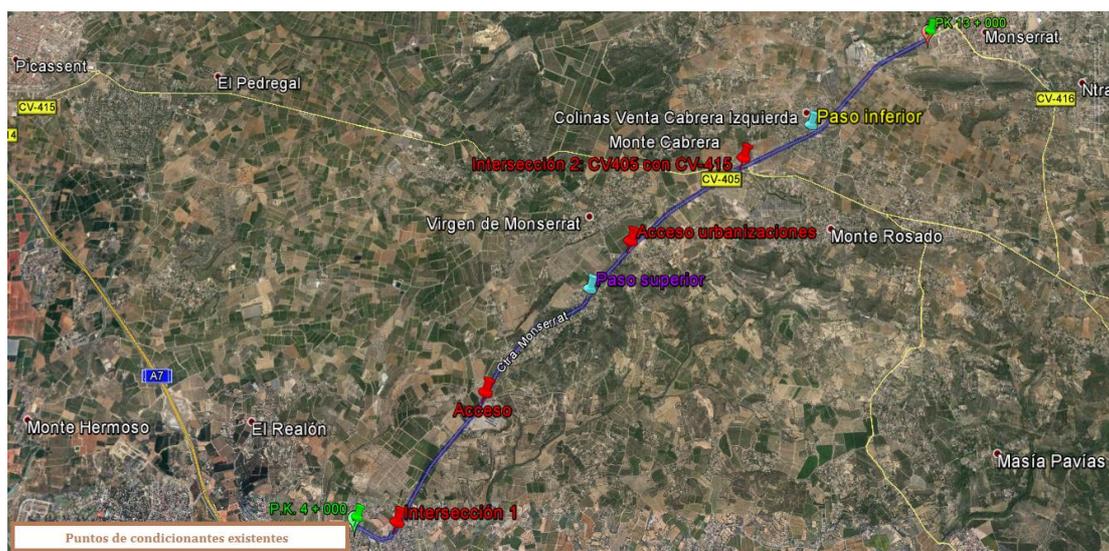


Figura 43. Condicionantes físicos existentes en la CV-405. Fuente: Google Earth.

A continuación, se detallan en imágenes ampliadas (Figuras 44, 45, 46, 47, 48 y 49) los puntos marcados en la Figura 43.



Figura 44. Acceso urbanización Masía Pavías. Fuente: Google Earth.



Sentido Monserrat-Torrent

Figura 45. Accesos a campos. Fuente: Google Earth.

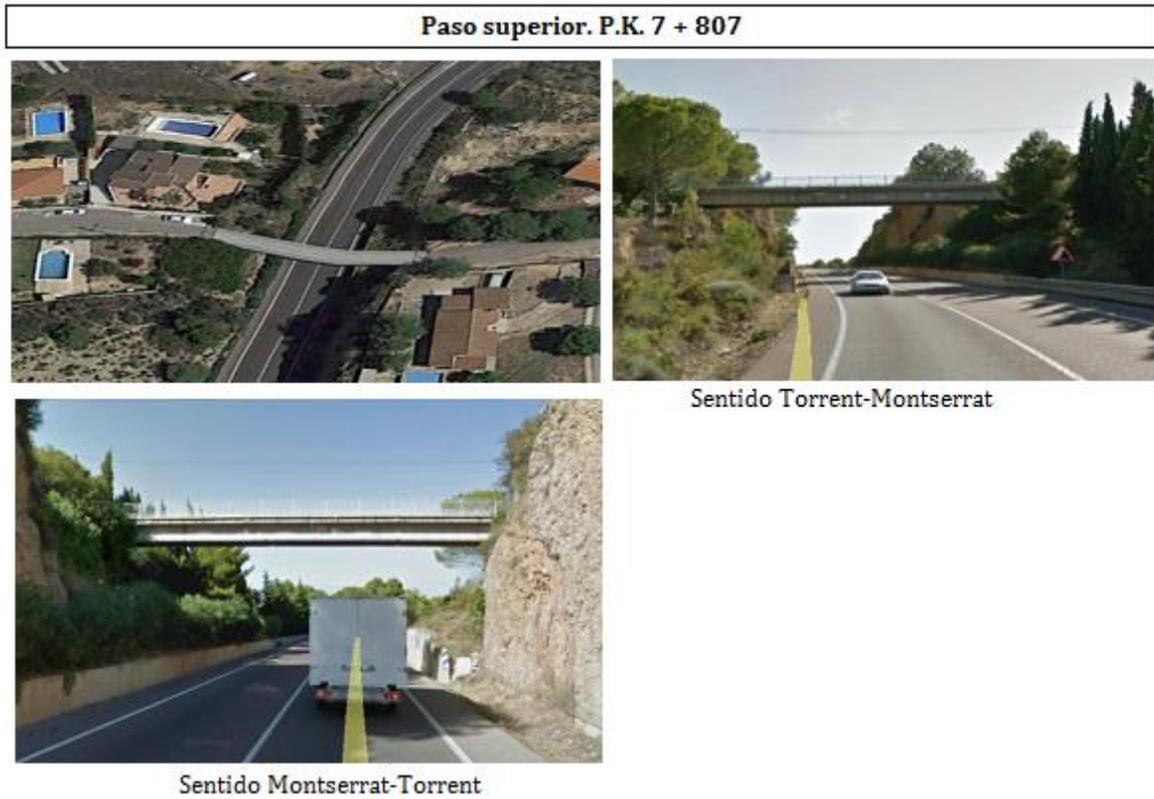


Figura 46. Paso superior. Fuente: Google Earth.



Figura 47. Acceso urbanizaciones Virgen de Montserrat. Fuente: Google Earth.

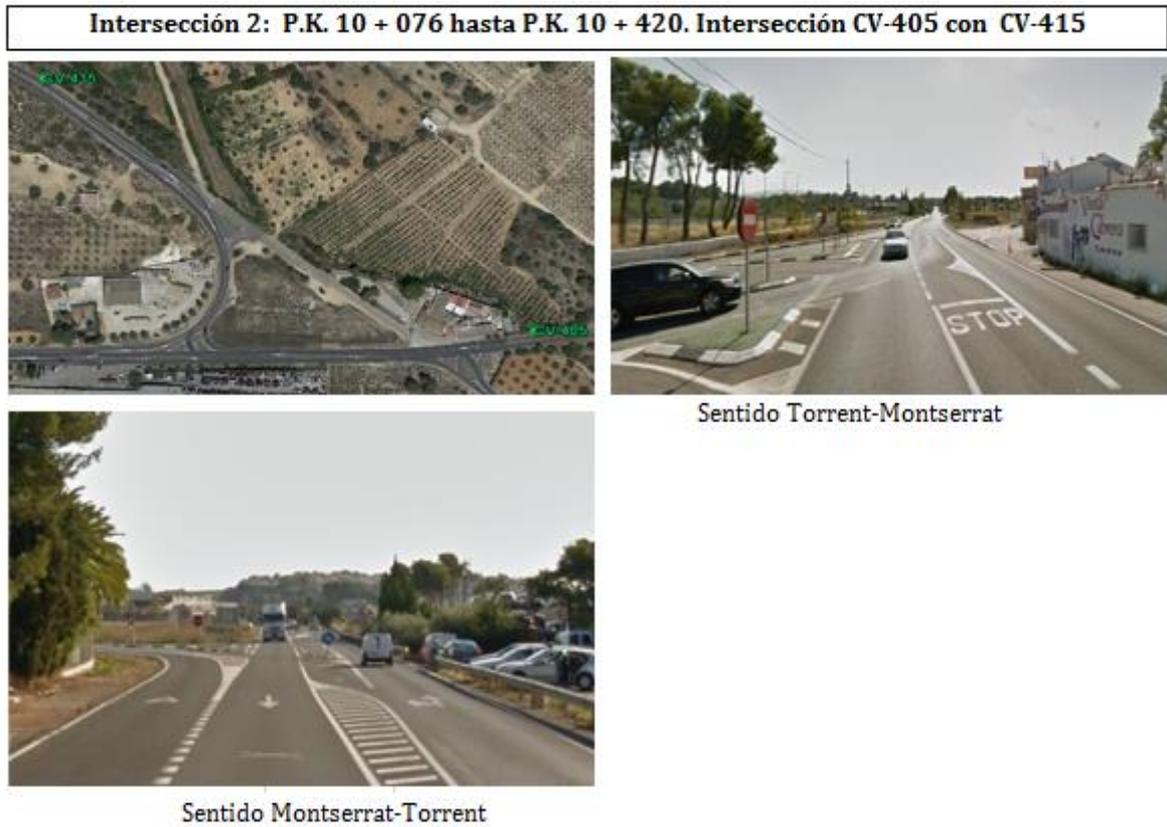


Figura 48. Conexión CV-405 con CV-415. Fuente: Google Earth.



Figura 49. Paso inferior. Fuente: Google Earth.

Expuestas las intersecciones y zonas a mantener fijas ante la posible solución de carretera 2+1, cabe señalar cómo de importantes son las condiciones de contorno para disponer esta tipología de carreteras en combinación a las carreteras convencionales, puesto que, se observan las limitaciones de disponer de secciones de adelantamiento en todo el tramo completo. Esto conlleva a optar por soluciones parciales, como, por ejemplo: con carriles de adelantamiento aislados, y prohibición de zonas de adelantamiento en secciones de dos carriles.

Propuesta de solución

En esta sección del trabajo se busca la manera de mejorar la funcionalidad del tráfico en la CV-405 mediante la incorporación de carriles de adelantamiento combinados con secciones 1+1 convencionales.

Tal y como se ha presentado en el apartado anterior, Condicionantes existentes, la carretera objeto de aplicación cuenta con numerosas restricciones de trazado iniciales, que dificultan la solución mediante secciones 2+1 completamente simétricas. Por lo que, es preciso optar por soluciones parciales.

Cabe mencionar, que a los condicionantes existentes, se suman inconvenientes como los numerosos giros a izquierdas que actualmente existen en esta carretera, y que, por su peligrosidad, ocasionan situaciones en las que se pone en riesgo la seguridad de los conductores. Por lo tanto, para solucionar este inconveniente se propone que, cuando se integre la solución incorporando secciones de 2+1, los giros a izquierdas queden suprimidos o, en todo caso, se puedan realizar en zonas donde no sean posibles llevar a cabo maniobras de adelantamiento, la velocidad límite en esa zona sea baja y la visibilidad buena para, de este modo, conseguir aumentar la seguridad durante la maniobra.

Por lo tanto, del estado actual de la CV-405, la situación de condicionantes físicos, detallados en el apartado anterior, con los que se parte son:

- Acceso a urbanización Masía Pavías.
- Accesos a campos.
- Paso superior.
- Acceso a urbanización Virgen de Montserrat.
- Intersección CV-405 con CV-415.
- Paso inferior entre urbanizaciones de Venta Cabrera situadas a ambos lados de la carretera.

En principio, para la toma de una solución, estos condicionantes se van a mantener fijos, y aquellos accesos existentes a caminos, que no se han detallado, es porque, o bien no afectan a la 2+1, o existen vías alternativas por las que es posible acceder.

Tras conocer los aspectos físicos que van a condicionar el emplazamiento de las secciones 2+1, el siguiente aspecto a determinar es la longitud óptima de carril de adelantamiento a considerar para diseñar dichas secciones. Esto se lleva a cabo tomando como criterio los resultados obtenidos del análisis realizado mediante microsimulación, empleando los criterios de diseño para carriles de adelantamiento propuestos en la Figura 40, dependiendo del nivel de tráfico de la CV-405 así como del porcentaje de vehículos pesados, recogidos tales datos en la Tabla 9.

El volumen de tráfico que transita por la carretera en cuestión durante el cuarto de hora más cargado se encuentra comprendido entre los casos intermedios de intensidades de

tráfico de 700-1300 veh/h, para los cuales se ha llevado a cabo el análisis de este Trabajo Final de Máster. Por otro lado, el porcentaje de vehículos pesados de un 4% se puede decir que es la media entre los dos primeros porcentajes de vehículos introducidos en el análisis. Por lo que:

- 1000 veh/h \in [700-1300] veh/h.
- 4% vehículos pesados \in [0 % -10 %].

Como resultado de lo anterior, para establecer la longitud óptima de la zona de adelantamiento hay que considerar para cinco casos los valores de Lza según la idoneidad del comportamiento del tráfico en cuanto a las medidas de desempeño estudiadas:

- Caso 1: Intensidad de tráfico 700 veh/h y 0% de vehículos pesados.
- Caso 2: Intensidad de tráfico 700 veh/h y 10% de vehículos pesados.
- Caso 3: Intensidad de tráfico 1300 veh/h y 0% de vehículos pesados.
- Caso 4: Intensidad de tráfico 1300 veh/h y 10% de vehículos pesados.
- Caso 5: Intensidad de tráfico 1300 veh/h y 5% de vehículos pesados. Se propone este último caso por si la zona de longitud de adelantamiento puede reducirse cuando el porcentaje de vehículos pesados es más bajo.

Casos	Volumen direccional (veh/h)	% Vehículos pesados	Medidas desempeño	Óptimo global
1	700	0	A	1000 - 3000 m
			PF	
			V _{puntual}	
			ATS	
2	700	10	A	1500 - 2500 m
			PF	
			V _{puntual}	
			ATS	
3	1300	0	A	1500 - 3000 m
			PF	
			V _{puntual}	
			ATS	
4	1300	10	A	2500 - 3000 m
			PF	
			V _{puntual}	
			ATS	
5	1300	5	A	2000 - 3000 m
			PF	
			V _{puntual}	
			ATS	

Tabla 10. Criterios de diseño para establecer longitud óptima de ZA para 1000 veh/h.

De la Tabla 10 se determina que para intensidad de tráfico de 1000 veh/h y 4% de vehículos pesados la longitud óptima de la zona de adelantamiento ha de tener un valor comprendido entre 1500-2000 m, podría tomarse un valor más alto, pero con los mínimos cumpliría. Como estos valores consideran la longitud de las cuñas de transición, variables según la velocidad de proyecto. La longitud efectiva del carril de adelantamiento queda comprendida entre 1250-1750 m.

La *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado* actual establece que la longitud de los carriles de adelantamiento no puede ser superior a 1500 m, de este modo, se toma tal valor de longitud como el óptimo para la zona de adelantamiento según las características de tráfico que presenta la CV-405.

La velocidad de proyecto de la CV-405 es de 90 km/h, que determina una longitud de las cuñas de transición en 115 m, la cuña de transición se ha de disponer tanto al inicio como al final del carril de adelantamiento.

Para este caso, debido a la velocidad de proyecto de la carretera convencional, las dimensiones de la zona cebreada de seguridad que se ha de disponer al final del carril de adelantamiento varía respecto a la considerada en las configuraciones de escenarios planteadas para el análisis. Análogamente al procedimiento empleado y siguiendo la normativa actual:

- El valor de la distancia de parada, aplicando la ecuación (1), tendría un valor de 150 m.
- Longitud de 115 m para las cuñas de transición.
- Los carriles de adelantamiento a disponer no serán alternos entre ambos sentidos de circulación; únicamente se dispondrá la zona cebreada al final del carril de adelantamiento en el sentido donde se disponga la sección 2+1.

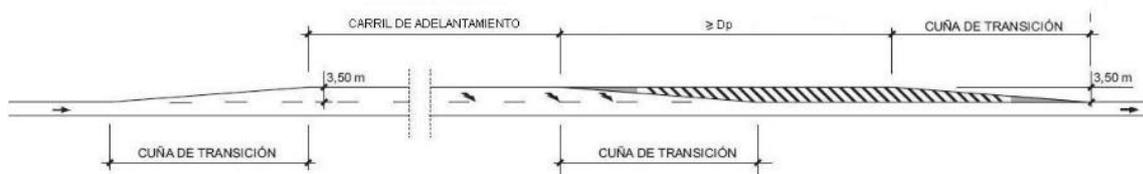


Figura 50. Carril adicional para adelantamiento con la zona cebreada reducida. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado, (2016).

En base a lo mencionado, las longitudes de la sección 2+1 total y la longitud de adelantamiento se pueden calcular, cuando la longitud de la zona cebreada se ha reducido y se ha tomado de 150 m de distancia de parada:

$$L_{sección\ 2+1} = L_{ZA} + 150 \quad (4)$$

$$L_{ZA} = L_{carril\ adelantamiento} + 2 \cdot L_{cuñas} \quad (5)$$

Como se ha determinado una longitud óptima de la zona de adelantamiento de 1500 m, se obtiene:

$$L_{sección\ 2+1} = 1880\ m$$

$$L_{adelantamiento} = 1730\ m$$

Los valores obtenidos son resultados de longitudes muy largas, que cuando se han intentado introducir en el tramo considerado de la CV-405, se ha hecho imposible debido a que la distancia disponible entre los puntos que se han mantenido fijos desde un inicio no es suficiente para encajar secciones con longitud total superior a 1600 m aproximadamente. Por lo que, se ha llegado a una alternativa de longitud de secciones 2+1 que no se puede llevar a cabo a causa de los condicionantes existentes a los que hay que ajustarse sin necesidad de modificaciones avanzadas en el trazado actual.

Ante esta situación, y tal y como se comentó en las conclusiones del análisis, el HCM 2010 considera dos medidas de desempeño para evaluar la funcionalidad del tráfico en carreteras de clase I: el porcentaje de vehículos en cola y la velocidad media de recorrido. Si nos ajustamos a los óptimos globales obtenidos en base a éstas últimas, se tendrían los valores de la Tabla 11.

Casos	Volumen direccional (veh/h)	% Vehículos pesados	Medidas desempeño	Óptimo global
1	700	0	PF	750 - 3500 m
			ATS	
2	700	10	PF	750 - 3500 m
			ATS	
3	1300	0	PF	750 - 3500 m
			ATS	
4	1300	10	PF	1000 - 3500 m
			ATS	

Tabla 11. Criterios de longitud óptima en base al HCM 2010.

La longitud óptima mínima con la que se cumplen las medidas de desempeño del HCM 2010 es 1000 m, que cuando se descuentan las longitudes de las cuñas de transición, se tiene que la longitud efectiva del carril de adelantamiento es de 750 m.

Con esta nueva longitud de la zona de adelantamiento se obtiene:

$$L_{sección\ sección\ 2+1} = 1130\ m < 1600\ m \quad \checkmark$$

$$L_{adelantamiento} = 980\ m$$

Estos resultados de longitudes caben entre las distancias disponibles entre los puntos fijos establecidos, por lo que, se plantea la opción de una longitud intermedia de entre los escenarios 1 y 2, 750 y 1250 m respectivamente, de 1000 metros de zona de

adelantamiento, para comprobar si podrían encajarse secciones 250 m más largas se obtiene:

$$L_{sección\ 2+1} = 1380\ m < 1600\ m \quad \checkmark$$
$$L_{adelantamiento} = 1230\ m$$

Como el total de la sección 2+1 a encajar es de longitud inferior a 1600 m, se va a tomar longitud efectiva de 1000 m para el carril de adelantamiento en las secciones de 2+1 para diseñar la solución.

Con estas medidas finales se van a plantear las posibles secciones 2+1 a encajar entre los P.K. 4+000 y 13+000 de la CV-405 y su distribución en el tramo.

Los criterios de partida a los que se ciñe la implantación de las zonas de adelantamiento son:

- Adaptación al perfil longitudinal existente.
- Disposición de carriles de adelantamiento no alternos.
- Respetar los puntos fijos establecidos en apartados anteriores.
- Cumplir con secciones de longitud de adelantamiento de 1000 m \in [750-1250] m siempre que sea posible.
- Se cuentan con cuatro posibles zonas donde encajar las secciones entre los puntos fijos siguientes y para la longitud de 1000 m:
 - Intersección 1: Acceso a la urbanización de Masía Pavías – Accesos a campos.
 - Accesos a campos - Paso superior.
 - Acceso urbanización Virgen de Montserrat – Intersección CV-405 y CV-450.
 - Paso inferior – Final del tramo (PK 13 + 000).
- Permitir giros a izquierdas en secciones 1+1 donde no esté permitido el adelantamiento.
- Eliminación de giros a izquierdas en tramos de sección 2+1.

De lo anterior, se concluye que las secciones 2+1 que caben en el tramo de estudio son cuatro, repartidas entre los cuatro tramos en los que ha quedado dividida la carretera por los puntos fijos establecidos desde un inicio.

Se han distribuido dos secciones de adelantamiento por cada sentido de circulación:

Sentido	P.K. inicio	P.K. fin	L sección 2+1 (m)	L carril adelant (m)
Torrent-Montserrat	4+570	5+950	1380	1320
	8+565	9+945	1380	1320
Montserrat-Torrent	6+206	7+586	1380	1320
	11+205	12+335	1130 *	980 *

* Sección 2+1 con longitud inferior al resto

Tabla 12. Posiciones exactas secciones 2+1 en la CV-405.

La sección 2+1 situada en los P.K. 11+205 y 12+335 no tiene la misma longitud que el resto, esto se debe a la presencia de un punto considerado como crítico en el P.K. 12+349, que da acceso a un pequeño polígono, y permite giro a izquierdas en una curva donde la visibilidad no es buena. Por lo que, para no restringir el acceso, se ha permitido el giro a izquierdas que pueden realizar los vehículos que vienen desde Torrent pero dentro de una zona de sección 1+1 donde las velocidades sean más bajas, y a partir de ese punto, los vehículos con origen desde Montserrat cuentan con su primera zona de adelantamiento, en subida, para que así los vehículos pesados que obstaculizan la circulación en pendiente puedan ser adelantados por los vehículos ligeros.

Por último, se mencionan los motivos por los que se ha optado por la distribución planteada:

- Favorecer los adelantamientos en aquellos segmentos donde la pendiente sea ascendente según el sentido de circulación; los vehículos lentos que obstaculicen el tráfico pueden ser adelantados.
- Mantener secciones de carretera convencional con adelantamientos prohibidos en la curva cerrada del principio del tramo.
- Dejar zona de no-adelantamiento a la entrada de Montserrat para que los vehículos entren más despacio al pueblo. Y viceversa, disponer de una sección 2+1 a poca distancia de la salida, en sentido Montserrat-Torrent, para agilizar maniobras de adelantamiento y que los vehículos circulen a mayor velocidad.
- Se ha intentado evitar la disposición de secciones de adelantamiento en zonas cercanas a núcleos de población donde se esperan desvíos y será preferible que la velocidad de circulación en esas áreas sea más lenta para evitar accidentes.

La solución, establecidas las secciones 2+1 a colocar, quedará totalmente definida cuando se combinen secciones 1+1 con 2+1, por lo tanto, se presentan en la Tabla 13 los puntos kilométricos entre los que queden situadas las diferentes tipologías de secciones en el tramo de aplicación. Se representa esquemáticamente en la Figura 51.

Sentido	Tipo de sección	P.K. inicio	P.K. fin
Ambos	1+1	4+000	4+570
Torrent-Montserrat	2+1	4+570	5+950
Ambos	1+1	5+950	6+206
Montserrat-Torrent	2+1	6+206	7+586
Ambos	1+1	7+586	8+565
Torrent-Montserrat	2+1	8+565	9+945
Ambos	1+1	9+945	11+205
Montserrat-Torrent	2+1	11+205	12+335
Ambos	1+1	12+335	13+000

Tabla 13. Posiciones de las secciones 1+1 y 2+1 en la CV-405.

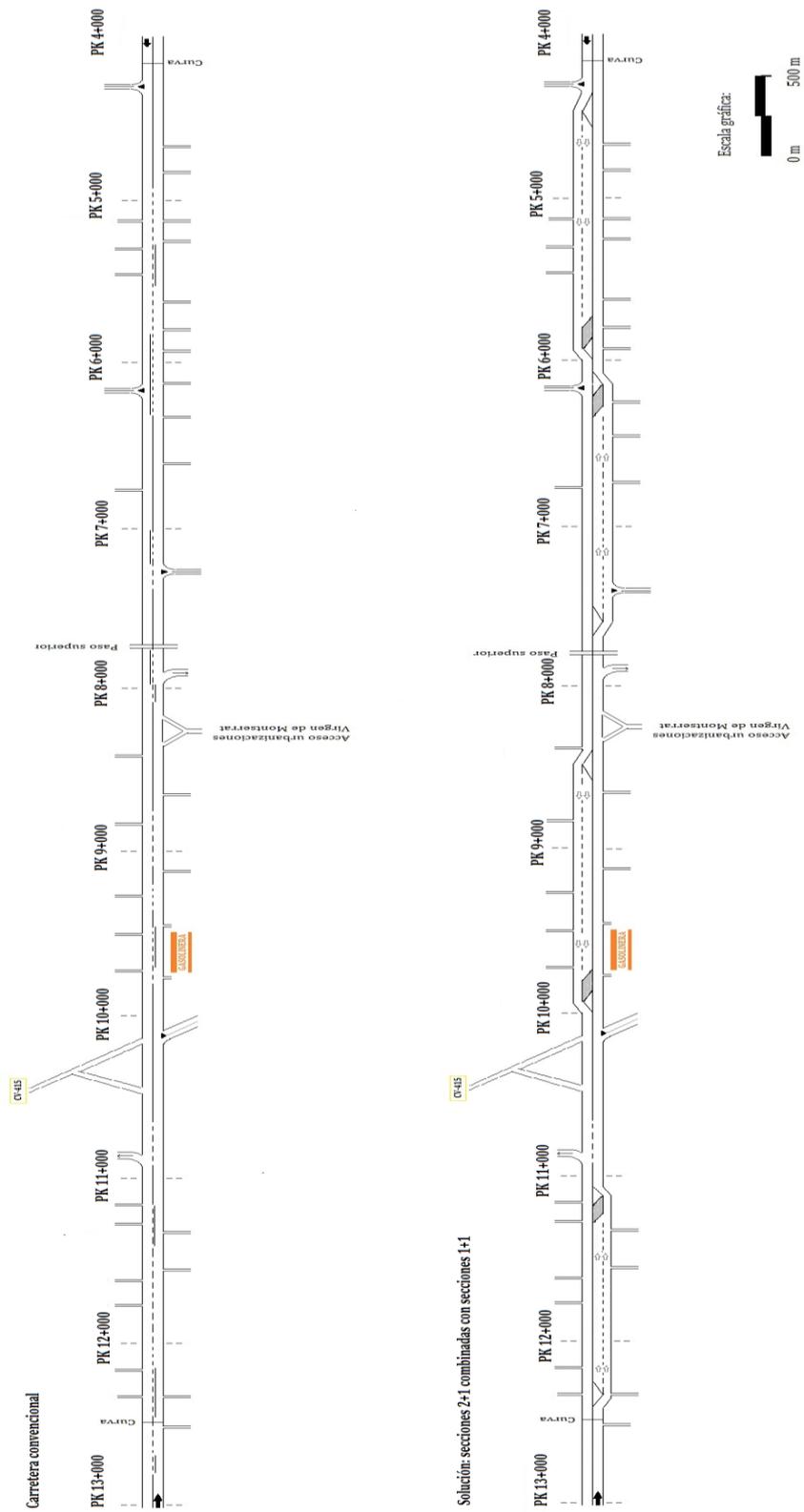


Figura 51. Esquema carretera convencional y solución propuesta.

Metodología

Creación de escenarios en Aimsun

La aplicación práctica consiste en crear los escenarios, actual y la posible solución, en el programa informático Aimsun donde simular el tráfico del tramo de la CV-405. Los escenarios a crear son dos:

- Configuración de escenario de carretera convencional: estado actual.
- Configuración del escenario de la solución propuesta: combinación de secciones 1+1 con 2+1.

Los escenarios se crean tal y como se ha explicado en el capítulo de creación del escenario inicial, pero en este caso hay ciertas diferencias que se comentan a continuación, dependiendo de si se crea el modelo de carretera convencional o la solución de carretera 1+1 con 2+1. Así como determinados parámetros que se han establecido para la carretera convencional porque se tenían de modelos creados anteriormente.

Carretera convencional

Con el objetivo de simular el comportamiento del tráfico existente en la CV-405 se crea la configuración del escenario pertinente con las características necesarias para cumplir, en la medida de lo posible, con la carretera real. Por lo que, en este caso se han considerado las pendientes en el tramo, así como las restricciones de velocidad a lo largo de la carretera. Asimismo, mencionar que las curvas no se pueden simular mediante Aimsun, por ello, para considerarlas en el modelo, se determina la longitud del tramo de curva y se limita la velocidad en el mismo.

De este modo, en primer lugar, se han determinado las zonas de adelantamientos permitidos, en un sentido y otro. Las zonas de adelantamiento no permitido a introducir en la carretera convencional a simular según la dirección del flujo se recogen en las Tablas 14 y 15.

Sentido	P.K. inicio	P.K. fin	Longitud no-adelantamiento (m)
Torrent-Montserrat	4 + 000	4 + 970	970
	5 + 871	7 + 333	1458,9
	7 + 616	7 + 940	324,4
	8 + 135	8 + 725	589,6
	9 + 147	9 + 242	94,8
	9 + 365	9 + 458	72,9
	9 + 746	10 + 648	902,5
	10 + 902	11 + 330	428,1
	12 + 874	13 + 000	130

Tabla 14. Zonas de no-adelantamiento en sentido Torrent-Montserrat.

Sentido	P.K. inicio	P.K. fin	Longitud no-adelantamiento (m)
Montserrat-Torrent	13 + 000	12 + 796	204
	12 + 507	12 + 137	370,3
	11 + 422	10 + 961	460,2
	10 + 716	9 + 814	902,5
	9 + 714	9 + 580	134
	9 + 453	9 + 355	97,7
	8 + 975	8 + 344	631,4
	8 + 160	7 + 827	331,6
	7 + 553	7 + 266	287,1
	7 + 009	6 + 666	343,1
	6 + 424	6 + 118	305,8
	5 + 484	5 + 355	128,9
4 + 958	4 + 047	911	

Tabla 15. Zonas de no-adelantamiento sentido Montserrat-Torrent.

A continuación, para conseguir un comportamiento más fiable del tráfico, se han introducido las diferentes pendientes del tramo de carretera. Esto se puede introducir en Aimsun mediante la creación de diferentes segmentos a lo largo del tramo, a los que se les asigna su correspondiente altitud, formando la pendiente existente de cada segmento en el que ha sido dividida la sección. Como en Aimsun se crean la sección principal y la sección espejo, ambas tendrán las mismas pendientes.

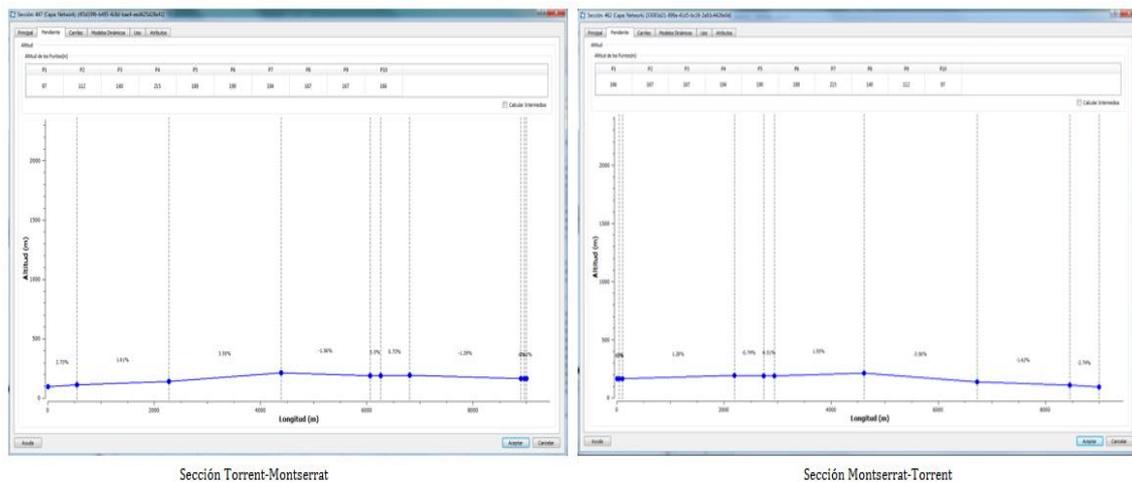


Figura 52. Captura de pantalla software Aimsun. Pendiente de la carretera.

Por último, otro aspecto relevante son las velocidades de los vehículos a su paso por la CV-405. Como no se tienen datos experimentales sobre velocidades, se aplican procedimientos comentados más adelante. Mientras que, en el programa informático Aimsun, con la misma metodología de introducción de pendientes, es posible dividir en segmentos para limitar la velocidad en los mismos.

El modo de estimar la velocidad media, o en su caso, la velocidad límite será distinto según dos elementos, curvas o rectas.

En primer lugar, para estimar la velocidad en curvas se han considerado tres procedimientos con los que obtener un valor con el que limitar la velocidad límite de los segmentos en Aimsun.

- *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado (2016)* para el cálculo de la velocidad en curva.
- Modelo de estimación de la velocidad media.
- Velocidades límite de la carretera.

La *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado (2016)* establece que para describir el comportamiento de un vehículo que circula por una curva circular se considera un modelo consistente en establecer su equilibrio transversal como sólido rígido, que recorre dicha curva en planta a velocidad constante, prescindiendo del efecto del sistema de suspensión.

Según este modelo, la velocidad de la curva circular, el radio, el coeficiente de rozamiento transversal movilizado y el peralte se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$V^2 = 127 \cdot R \cdot \left(f_t + \frac{p}{100} \right) \quad (6)$$

Donde:

V = Velocidad de la curva circular (km/h).

R = Radio de la circunferencia que define el eje de trazado en planta (m).

f_t = Coeficiente de rozamiento transversal movilizado.

p = Peralte (%).

Para calcular la velocidad de la curva circular mediante la expresión (6) hay que determinar el radio de la curva, para ello se ha restituido el tramo de carretera donde se quiere obtener el valor del radio. El procedimiento de restitución para conseguir el radio de la curva de la Figura 53 ha sido el siguiente:



Figura 53. Curva cerrada en la CV-405. Fuente: Google Earth.

Se ha marcado el tramo a restituir, la curva, y trasladado a Civil, donde da los resultados de radio que se está buscando obtener.

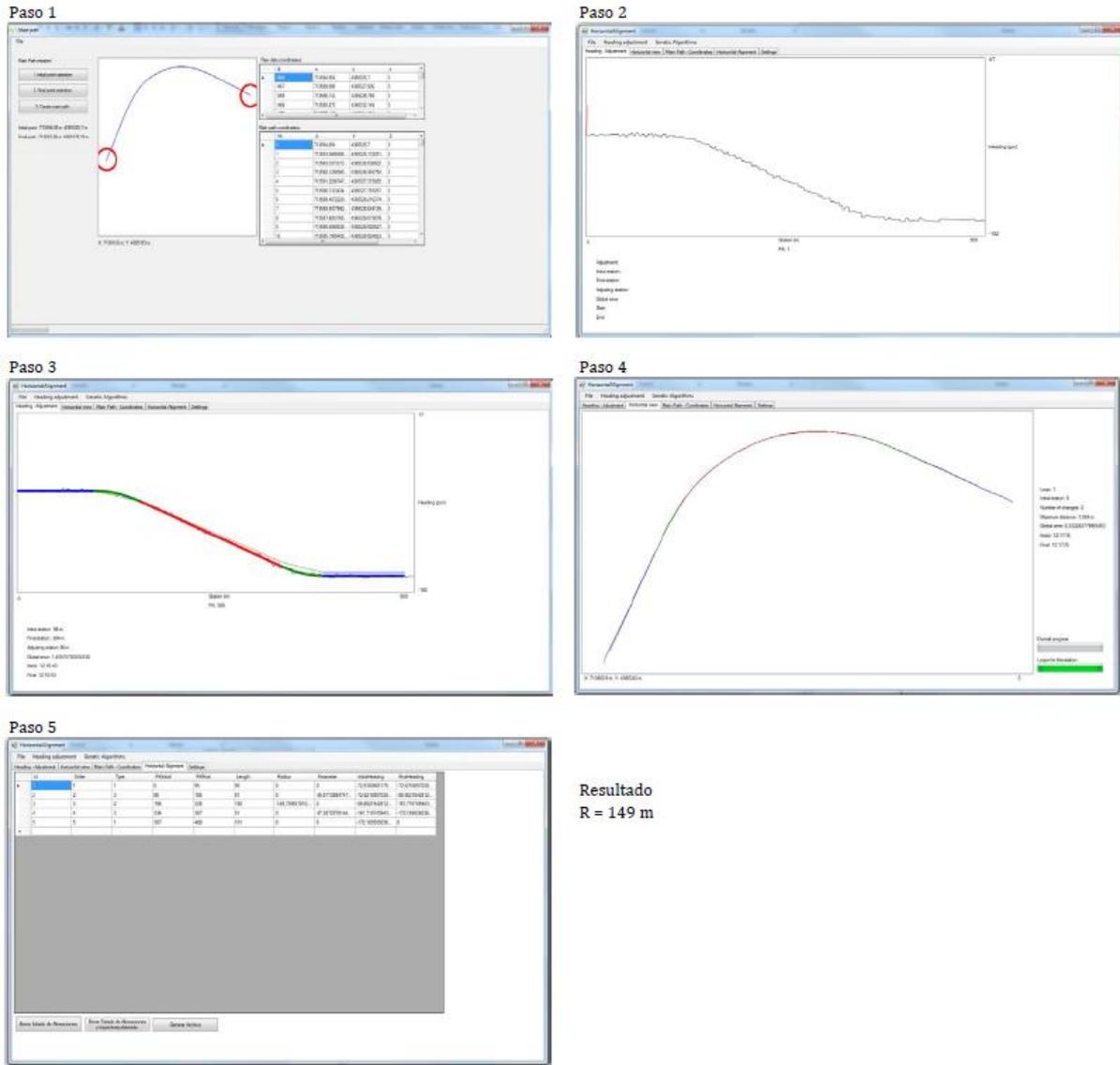


Figura 54. Procedimiento empleado para obtener el radio de la curva más cerrada del tramo.

Obtenido el radio de la curva, se pasa a buscar el coeficiente de rozamiento transversal movilizado, que en base a la Tabla 16 de la Instrucción de Carreteras 3.1-IC se obtiene un coeficiente de 0,113.

V_e (km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
f_{LMAX}	0,180	0,166	0,151	0,137	0,122	0,113	0,104	0,096	0,087	0,078	0,069

Tabla 16. Coeficiente de rozamiento transversal máximo movilizado. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado (2016).

Y, el último valor por conocer para calcular la velocidad circular sería el peralte, que en base a la Tabla 17, sacada de la *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado* se obtiene:

VELOCIDAD DE PROYECTO (V_p) (km/h)	GRUPO 1		GRUPO 2		GRUPO 3	
	A-140 y A-130		A-120, A-110, A-100, A-90, A-80 y C-100		C-90, C-80, C-70, C-60, C-50 y C-40	
	RADIO MÍNIMO (m)	PERALTE MÁXIMO (%)	RADIO MÍNIMO (m)	PERALTE MÁXIMO (%)	RADIO MÍNIMO (m)	PERALTE MÁXIMO (%)
140	1 050	8,00	--	--	--	--
130	850	8,00	--	--	--	--
120	--	--	700	8,00	--	--
110	--	--	550	8,00	--	--
100	--	--	450	8,00	--	--
90	--	--	350	8,00	350	7,00
80	--	--	250	8,00	265	7,00
70	--	--	--	--	190	7,00
60	--	--	--	--	130	7,00
50	--	--	--	--	85	7,00
40	--	--	--	--	50	7,00

Tabla 17. Relación Velocidad de Proyecto - Radio mínimo - Peralte máximo. Fuente: Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado (2016),

La velocidad en curva circular queda igual a 58,84 km/h.

En segundo lugar, otro método para limitar la velocidad en el programa, se ha empleado el modelo propuesto por Pérez Zuriaga, A. M., en su Tesis Doctoral para obtener la velocidad media en curva, viene dado por la expresión (7):

$$V_M = \sqrt{-7619,89 + 2420,63 \cdot \ln(R)} \quad (7)$$

donde:

R: radio de la curva circular (m).

Que, para 150 m de radio, se obtiene un valor de velocidad de operación de 67 km/h. Este valor de velocidad es 8 km/h más alto que el obtenido mediante el método que propone la actual *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado*.

El tercer modo de obtener la velocidad en la CV-405 es mirando la velocidad límite indicada mediante la señalización vertical, concretamente para la velocidad en curva,

establece el límite en un valor de 50 km/h. Este último es el valor más restrictivo, por lo que se tomará como velocidad de operación en el segmento de curva circular.

Por otro lado, la limitación de velocidad media en rectas puede estimarse mediante:

- Modelo de velocidad media en rectas desarrollado por Pérez Zuriaga, A. M.

$$V_M = \sqrt{5726,48 + 1,79155 \cdot (L + L_{CL_{12}} + L_{CL_{21}})} \quad (8)$$

donde:

L: longitud de la recta (m).

$L_{CL_{12}}$: longitud clotoide al inicio de la recta (m).

$L_{CL_{21}}$: longitud clotoide al final de la recta (m).

Segmento	Elemento*	V media (km/h)	Rango de valores
1	Curva	67,15	65-70
2	Recta	85,25	80-90
	Curva	90,65	
3	Recta	84,30	80-90
	Curva	88,95	
4	Recta	81,63	70-90
	Curva	90,51	
	Recta	84,28	
	Curva	67,15	
	Recta	78,11	
	Curva	70,74	
	Recta	80,67	
	Curva	68,85	
	Recta	83,99	
	Curva	76,60	
	Recta	85,32	
	Curva	97,86	
	Recta	85,53	
	Curva	84,34	
Recta	84,91		
5	Recta	77,63	85-90
	Curva	90,80	
	Recta	76,85	
6	Recta	81,95	
7	Curva	80,77	

	Recta	84,44	85
8	Recta		
9	Curva	81,15	80-83
	Recta	82,92	

*Los elementos curva se han calculado mediante la expresión (5)

Tabla 18. Velocidades medias obtenidas mediante el modelo propuesto por Pérez Zuriaga, A.

- Velocidades límite de la carretera.

Segmento	V límite (km/h)
1	50
2	80
3	80
4	70
5	80
6	60
7	80
8	70
9	50

Tabla 19. Velocidades límite de la carretera.

De los valores recogidos en las Tablas 18 y 19, se opta por tomar los valores de la segunda, pues son a los que deberían circular los vehículos por seguridad.

Carretera con secciones 1+1 y 2+1

La creación del escenario de la solución propuesta para mejorar la funcionalidad de la CV-405 en el programa informático Aimsun se llevará a cabo siguiendo los mismos pasos que para las configuraciones de los ocho escenarios de simulación con los que se ha efectuado el análisis.

En esta ocasión se configuran dos escenarios, para cada sentido de circulación del tráfico, puesto que Aimsun no es capaz de modelar una carretera 2+1 en las dos direcciones de flujo. Por lo tanto, habrá un escenario en dirección Torrent-Montserrat, y su contrario.

Como en el caso de carretera convencional, se definen las pendientes para distintos segmentos, se limitan las velocidades de los vehículos y de las secciones, esta última a la velocidad de proyecto y las líneas continuas y discontinuas, ya que son el modo de diferenciar en el programa si nos encontramos en una sección 1+1 o 2+1.

En cuanto a las velocidades, se han diferenciado segmentos coincidentes a las secciones 2+1 para asignar la velocidad de proyecto en estas zonas y cuando los vehículos circulen por secciones 1+1 la velocidad sea algo más baja.

Segmento	Carril	Velocidad
6	2	50
6	1	50
5	2	90
5	1	90
4	2	70
4	1	70
3	2	90
3	1	90
2	2	70
2	1	70
1	2	60
1	1	60

Segmento	Carril	Velocidad
1	1	50
1	2	50
2	1	90
2	2	90
3	1	70
3	2	70
4	1	90
4	2	90
5	1	70
5	2	70
6	1	60
6	2	60

Figura 55. Captura software Aimsun. Velocidades detalladas.

Finalmente, señalar que para los escenarios creados no se consideran desvíos ni incorporaciones de vehículos, únicamente se representa el tronco de la sección y se considerará una intensidad de tráfico constante en toda la sección simulada.

Calibración de escenarios

El proceso de calibración ha sido el mismo que el explicado para los escenarios sobre los que se ha hecho el análisis inicial. Se distinguen dos niveles de calibración, al igual que antes.

Nivel microscópico

Los valores de los parámetros para generar condiciones reales se han tomado los mismos que los anteriormente detallados, exceptuando aquellos que se disponían de calibraciones anteriores obtenidas de datos experimentales en carreteras convencionales españolas, concretamente de la N-225 y se pueden aplicar para la CV-405. Son los siguientes:

- Máxima aceleración máxima de cada vehículo.

Tipo de vehículo	Media(m/s ²)	Desviación(m/s ²)	Mínimo(m/s ²)	Máximo(m/s ²)
Ligero	4	0,2	3,60	4,40
Pesado	1	0,5	0,6	1,8

Tabla 20. Valores de la aceleración máxima.

- Distribución de velocidad máxima deseada de cada vehículo.

Variable		Vehículo ligero	Vehículo pesado
V _{max} (km/h) (lognormal)	Media	100	83
	Desviación típica	0,9	0,4
	Mínimo	70	50
	Máximo	150	95
Velocidad máxima permitida		100 km/h	

Tabla 21. Valores de la velocidad deseada.

- Factor de aceptación de la velocidad de cada vehículo.

Tipo de vehículo	Media(m/s ²)	Desviación(m/s ²)	Mínimo(m/s ²)	Máximo(m/s ²)
Ligero	1,05	0,1	0,85	1,25
Pesado	1	0,05	0,95	1,05

Tabla 22. Valores del factor de aceptación de la velocidad.

El resto de parámetros se mantienen con los mismos valores.

Nivel macroscópico

Para este caso se mantienen todos los parámetros iguales que para la creación de escenarios inicial.

Por último, la diferencia entre la carretera convencional y el escenario con secciones 1+1 y 2+1 viene dada por la distancia y factor de visibilidad.

Escenarios	Distancia de visibilidad (m)	Factor de visibilidad
Carretera convencional	250	1,75
Solución propuesta	20	2,5

Tabla 23. Valor de los parámetros de visibilidad y distancia de visibilidad según el tipo de carretera.

Análisis de resultados en carretera convencional vs carretera 2+1 parcial

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones realizadas sobre las configuraciones de escenarios en la CV-405, con el fin de evaluar la funcionalidad del tráfico en la misma, y observar las mejoras, si las hay, que presentan las configuraciones con incorporaciones de secciones 2+1. Este análisis se lleva a cabo mediante el estudio de las medidas de desempeño planteadas en este Trabajo Final de Máster:

- Porcentaje de adelantamientos.
- Porcentaje de vehículos en cola (PF).
- Velocidad media de recorrido en escenarios (ATS).

Los datos de tráfico que se han tomado para la simulación de la CV-405 son:

- Porcentaje de vehículos pesados: 4%.
- Un reparto, el más descompensado.
- Combinaciones de volumen de tráfico direccional y opuesto a simular en ambos escenarios para:
 - Estado en el momento de toma de datos, año 2012.
 - Crecimiento esperado en 2013-2016: factor multiplicador de la hora punta de 1,22% (BOE, año 2010).
 - Hora valle, se reduce el nivel de tráfico al 50% de la hora punta.

Situaciones	Dirección	Tráfico total (veh/h)	% vehículos pesados	Réplicas
Estado actual	1	1000-515*	4*	15 replicaciones
	2	515-1000*		
Crecimiento esperado	1	1220-628		
	2	628-1220		
Hora valle	1	500-256		
	2	256-500		

* Datos tomados de la Tesis de Moreno, A. T., (2015).

1: Torrent-Montserrat.

2: Montserrat-Torrent.

Todas las situaciones se simulará para todos los escenarios.

Tabla 24. Características a introducir en los escenarios configurados para el caso práctico.

Resultados y discusión

Para el análisis, se han considerado las configuraciones de escenarios propuestos en la aplicación práctica, correspondientes al estado actual y a la solución planteada.

La finalidad es observar las posibles mejoras sobre la funcionalidad del tráfico cuando se incluyen secciones de adelantamiento en un tramo de carretera convencional.

Siguiendo el esquema planteado en el análisis de escenarios se presentan los resultados obtenidos del porcentaje de adelantamientos, y posteriormente, los resultados de las medidas de desempeño del porcentaje de vehículos en cola y la velocidad media de recorrido.

Porcentaje de adelantamientos

En primer lugar, se analizan los adelantamientos que tienen lugar según el escenario y para las mismas intensidades de tráfico.

Se presentan los resultados comparando cada dirección por separado, ya que en Aimsun no se pueden crear carreteras 2+1 conjuntas, sino que es necesario un escenario diferente por cada dirección.

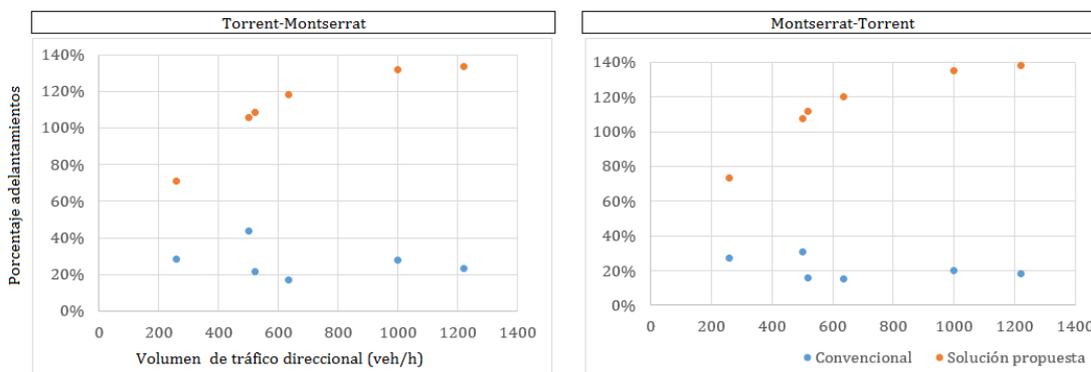


Figura 56. Comparativa porcentaje adelantamientos.

La presencia de carriles de adelantamiento aumenta en gran número la posibilidad de llevar a cabo la maniobra, esto se ve reflejado en los escenarios representados con claras diferencias entre los que se producen en carretera convencional y cuando se encajan secciones 2+1. Además, se puede observar que cuanto mayor es la intensidad de tráfico, en carretera convencional el porcentaje disminuye debido a que hay numerosos vehículos en dirección opuesta que imposibilitan la maniobra, mientras que, en la solución planteada tienen su carril expreso y no se encuentra este problema.

Porcentaje de vehículos en cola

A continuación, los resultados de porcentaje de vehículos en cola, tal y como se ha podido ver en el análisis inicial ningún escenario ofrecía claras mejoras sobre otro porque al final de la carretera siempre estaban en cola.

En cambio, respecto a una carretera convencional estos porcentajes se ven reducidos.

Los resultados se han obtenido al final del tramo, según la dirección, puesto que, para evaluar la eficacia de la sección se busca determinar el porcentaje de vehículos en cola en puntos cercanos al final del recorrido.

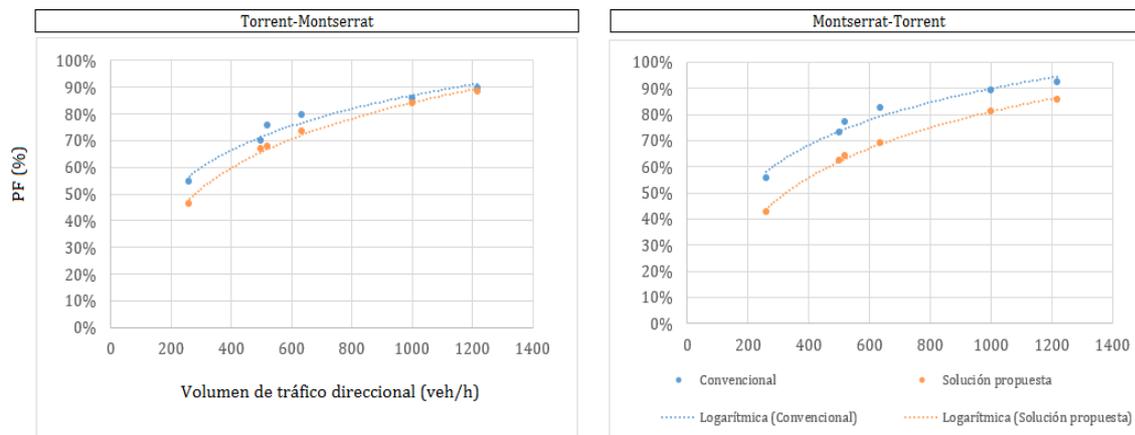


Figura 57. Comparativa porcentaje de vehículos en cola.

A pesar de que la solución propuesta muestra que, a mayores intensidades, el porcentaje de vehículos en cola será alto, se observan mejoras respecto a la carretera convencional.

Esto se asocia a que con la carretera 2+1 no se mejora la capacidad de la vía, pero sí, gracias a que el reparto no influye, es decir, los vehículos en sentido opuesto no interfieren en los adelantamientos, los vehículos rápidos pueden adelantar y se minimiza el porcentaje de vehículos en cola en la sección.

De la evaluación de esta medida, se puede decir que, cuando las intensidades de tráfico sean altas, los vehículos terminarán yendo en cola sea cual sea la tipología de carretera, pero gracias a las secciones 2+1 baja ligeramente el total de vehículos en cola. Lo cual favorece a la funcionalidad del tráfico.

ATS

Tras el análisis del porcentaje de adelantamientos y el porcentaje de vehículos en cola se han comparado los resultados de la velocidad media de recorrido. Inicialmente se ha observado que, a medida que la intensidad de tráfico crece, la velocidad media se ve afectada directamente. También se ha observado que, a mayor porcentaje de zona de adelantamiento, mayor es la velocidad media.

Los resultados obtenidos son:

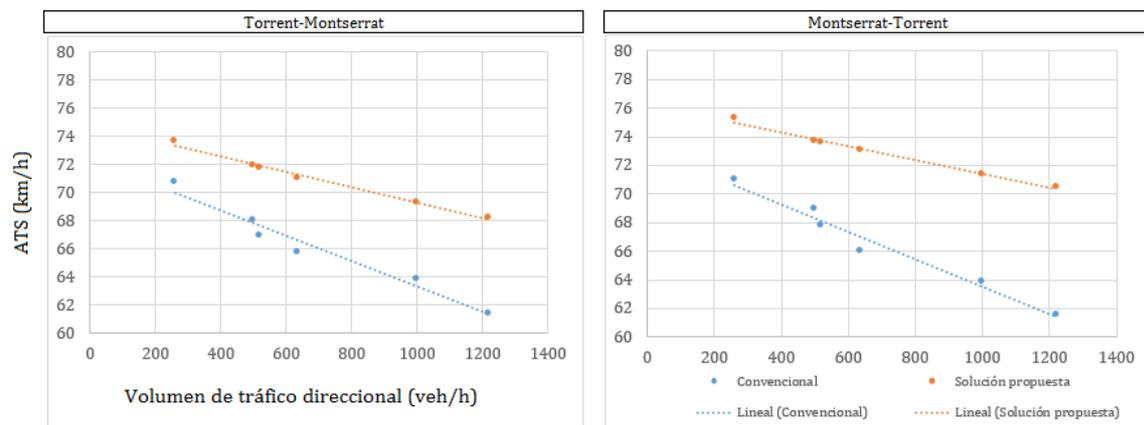


Figura 58. Comparativa ATS.

Se observa un aumento de entre 4-6 km/h de la velocidad media de recorrido por la presencia de carriles de adelantamiento. Así como una disminución progresiva conforme la intensidad de tráfico es mayor.

Asimismo, cabe señalar que la disminución de la velocidad media es mayor en el escenario de carretera convencional porque la diferencia de velocidad entre el caso de menor intensidad y el caso de máxima intensidad, es de aproximadamente 10 km/h, mientras que, con la solución propuesta, tal disminución es de 5 km/h. Es decir, la diferencia de velocidad media de recorrido entre casos de intensidad extremos, es el doble para carretera convencional.

Esto indica que el escenario de carretera convencional será dos veces más susceptible a disminuir la velocidad media de recorrido ante aumentos en la demanda de tráfico.

Conclusiones

En este capítulo se incluyen las conclusiones que derivan del estudio de la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1 mediante microsimulación, y donde uno de los objetivos era proponer unos criterios de diseño para determinar la longitud de adelantamiento óptima según las características operacionales de la carrera. Se aplican a la CV-405 como caso práctico de este Trabajo Final de Máster.

Se recogen las principales conclusiones obtenidas de la metodología, análisis de resultados y aplicación a un caso real en una carretera convencional en la provincia de Valencia.

Las conclusiones **metodológicas** son:

- Trabajar con un programa de microsimulación implica calibrar el modelo adecuadamente para conseguir un comportamiento de los conductores semejante al de la realidad.
- El programa informático utilizado, Aimsun, conocidos los 14 parámetros a calibrar, ofrece buenos resultados de microsimulación de tráfico.
- La falta de datos experimentales de carreteras 2+1 en España hace que se asuman comportamientos similares de los conductores españoles con conductores de otros países, como Polonia.

Conclusiones del **análisis de resultados**:

- Las medidas de desempeño consideradas dan visión del comportamiento funcional de tráfico en carreteras 2+1.
- Se utilizan las medidas de desempeño establecidas por el HCM 2010, a falta de una guía española.
- En el HCM 2010 se habla de nivel de servicio para carreteras convencionales, por ausencia de normativas que consideren las carreteras 2+1, se han asumido que con las mismas medidas de desempeño se puede evaluar el nivel de servicio de estas.
- A falta de estudios que determinen las posiciones inicio/fin de los adelantamientos en secciones 2+1 durante la microsimulación. En esta investigación se observa que la maniobra de adelantamiento se lleva a cabo al inicio del tramo, sea cual sea la longitud de adelantamiento, quedando así verificado que el comportamiento de los conductores es razonable en carriles de adelantamiento de carreteras 2+1.
- La medida de desempeño relacionada con la velocidad media de recorrido, ATS, se ve afectada por el crecimiento del volumen de tráfico direccional y el

porcentaje de vehículos pesados. La influencia del porcentaje de vehículos pesados es menor a la del volumen direccional.

- El porcentaje de vehículos en cola presenta forma logarítmica, como en el HCM 2010, y se ve notablemente aumentado por el volumen de tráfico direccional. Los distintos escenarios estudiados, no presentan mejoras del porcentaje de vehículos en cola por tener mayor longitud de zona de adelantamiento. Por lo que, una mayor longitud de zona de adelantamiento no disminuye el porcentaje de vehículos en cola, sino que esta medida se ve afectada directamente por el volumen direccional de tráfico.

Sobre la **longitud de las zonas de adelantamiento**:

- Se busca que la longitud de la zona de adelantamiento sea tal que, la vía sea efectiva. Existe una tendencia de mejora de las medidas de desempeño al aumentar la longitud de la zona de adelantamiento.
- Carreteras de bajas intensidades de tráfico, no necesitan longitudes de adelantamiento medias-largas para mejorar su efectividad.
- Los adelantamientos se ven favorecidos ante longitudes de adelantamiento largas (≥ 1500 m) cuando la carretera ha de soportar intensidades de tráfico de 1300-1900 veh/h.
- El porcentaje de adelantamientos depende del volumen de tráfico direccional. En carreteras 2+1 se aumenta el porcentaje de adelantamientos gracias a que los vehículos no están condicionados por el volumen direccional opuesto.
- La longitud de las zonas de adelantamiento óptima está fielmente relacionada a la intensidad de tráfico de la carretera.

Sobre el **análisis funcional** en tramos de carretera de 10 km:

- El reparto, muy influyente en carreteras convencionales, en carreteras 2+1 no presenta inconveniente para realizar el adelantamiento.
- La funcionalidad no se ve favorecida con longitudes de zona de adelantamiento cortas, sino que benefician zonas medias o largas.
- El HCM 2010, establece que las medidas de desempeño que determinan el nivel de servicio en carreteras de clase I, asumiendo esta clasificación para carreteras 2+1, son ATS y el porcentaje de tiempo en cola (PTSF) que, se ha asumido igual al porcentaje de vehículos en cola (PF). De este estudio se observa que, la medida limitante para la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1 es ATS, pues, el porcentaje de vehículos en cola obtenido no presenta diferencias sustanciales entre escenarios.

Adecuación del **HCM 2010 a las condiciones de carreteras 2+1:**

- Se asume el criterio de un intervalo de 3 segundos para determinar los vehículos en cola, si bien no es asimilable completamente al porcentaje de tiempo en cola que propone para determinar el nivel de servicio.
- No establece consideraciones específicas para carreteras 2+1.
- Asume condiciones locales, no se ajusta a condiciones españolas.
- No considera el efecto de la longitud media de la zona de adelantamiento para carretera convencionales, con más motivo, tampoco para carreteras 2+1.

Conclusiones derivadas de la **aplicación práctica:**

- Dificultad de incorporar secciones 2+1 alternas y completamente simétricas a tramos de carreteras convencionales ya construidos, por limitaciones del trazado en planta existente. Es aconsejable optar por soluciones parciales que combinen secciones 2+1 con secciones 1+1.
- Las carreteras 2+1 son una medida interesante para casos de carreteras convencionales con altas intensidades de tráfico.
- A la vista de los resultados de las medidas de desempeño evaluadas, introducir secciones 2+1 combinadas con 1+1 en la CV-405 supone una mejora de la funcionalidad, con mejoras tanto en la velocidad media de recorrido como una disminución del porcentaje de vehículos en cola. Los adelantamientos también se han visto mejorados gracias a la no interferencia de los carriles de adelantamiento con los vehículos del carril opuesto.
- Aspectos que no se han evaluado en este Trabajo Final de Máster, pero que no dejan de tener relevancia son:
 - Refuerzo de señalización horizontal y vertical cuando se incorporan carriles de adelantamiento con secciones 1+1 que no den lugar a confusión.
 - En muchas carreteras convencionales el tránsito de ciclistas suele ser elevado. En estos casos, se esperan velocidades altas en secciones 2+1 y podría afectar a la seguridad de los ciclistas que circulen por el arcén. Puestos a modificar el tramo, sería recomendable disponer de carril bici apto para ciclistas en carretera.

Estos resultados proporcionan herramientas para el análisis de la operación del tráfico en carreteras 2+1. El siguiente paso sería adecuar lo mencionado aquí para condiciones españolas.

Además, existen limitaciones propias del desarrollo del trabajo, como los escenarios de simulación, con distintos porcentajes de zonas de adelantamiento para disponer secciones 2+1 en un tramo de 10 km, sería conveniente simular tramos que tengan el mismo porcentaje de zona de adelantamiento y de no-adelantamiento.

Por otro lado, la evaluación de la funcionalidad del tráfico se ha hecho considerando medidas de desempeño relacionadas con la velocidad media de recorrido y el porcentaje de vehículos en cola; así como la velocidad puntual y el porcentaje de adelantamientos, que no vienen establecidas en ningún manual. En base a las cuatro medidas mencionadas ha sido posible el desarrollo de criterios técnicos de longitud óptima para carril de adelantamiento.

Futuras líneas de investigación

En el Trabajo Final de Máster se ha evaluado la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1 y desarrollado criterios técnicos para la adecuada estimación de longitud óptima de adelantamiento. No obstante, existen aspectos que no se han abarcado durante el desarrollo del trabajo, o ideas que han surgido del mismo.

Se enumeran las futuras líneas de investigación a realizar en estudios posteriores:

- Calibrar y validar el modelo creado para carreteras 2+1 en este Trabajo de Fin de Máster con datos experimentales de carreteras españolas.
- Profundizar en el estudio de la influencia del porcentaje de zona de adelantamiento no permitido, asimetría y simetría completa. Propuesta de nuevas configuraciones geométricas.
- Incorporar en los programas de microsimulación modelos que consideren interferencias ocasionadas por ciclistas.
- Propuesta de niveles de servicio en función de las medidas de desempeño. Hasta ahora no existe normativa que considere esta clasificación para carreteras 2+1 y es necesario aplicar lo establecido por el HCM 2010 para carretera convencional.

Conclusión

Una vez realizado el presente Estudio enmarcado como Trabajo Final de Máster, considerando que se han cumplido los objetivos establecidos y tras su revisión por parte del tutor y del cotutor del mismo, se presenta a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universitat Politècnica de València y se eleva a su calificación por el Tribunal correspondiente al Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, a la espera de su defensa pública el día fijado a dichos efectos.

Valencia, a 6 de septiembre de 2016



Mercedes Rodríguez Martínez

Referencias

- Bentaleb, K., Lakouari, N., Marzoug, R., Ez-Zahraouy, H., & Benyoussef, A. (2014). “*Simulation study of traffic car accidents in single-lane highway*”. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 413. Págs: 473-480.
- Bergh, T., & Carlsson, A. (2000). “*2+1-Roads with and without cable barriers: Speed performance*”. *Proceedings of the Fourth International Symposium on Highway Capacity*, Transportation Research Board, Hawaii, USA. Págs:188-199.
- Bergh, T., Carlsson, A., & Larsson, M. (2003). “*Swedish vision zero experience*”. *International Journal of Crashworthiness*, 8. Págs: 159-167.
- Brewer, M. A., & Wooldridge, M. D. (2003). “*Signing for passing lane sections on two lane rural roadways in Texas*”. En: TRB 2003 Annual Meeting.
- Brewer, M. A., & Venglar, S. P. (2010). “*Passing behavior of drivers on Super 2 highways in Texas*”. 4th International Symposium on Highway Geometric Design.
- Cafiso, S., D’Agostino, C., Kiec, M., (2015). “*Investigating the influence on safety and traffic performance of 2+1 road sections in Poland*”.
- Gattis, J. L., Bhave, R., & Duncan, L. K. (2006). “*Alternating passing lane lengths. Geometric Design and the Effects on Traffic Operations 2006*”, (1961). Págs: 16-23.
- Gerondeau, C., Moberg, J., Bergh, T., Carlsson, A., Dadole, Y., & Gautier, S. (2007). “*Swedish and french experience in 2+1 roads: Highways as safe as motorways*”. En: *Highways magazine* nº 153. Págs: 26-37.
- Harwood, D. W., St. John, A. D., & Warren, D. L. (1985). “*Operational and safety effectiveness of passing lanes on two-lane highways*”. En: *Transportation Research Record*. Págs: 31-39.
- Hino, Y., & Nagatani, T. (2015). “*Asymmetric effect of route-length difference and bottleneck on route choice in two-route traffic system*”. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol 428. Págs: 416-425.
- Irzik, I. M. (2010). “*Layout of 2 1-routes in Germany-new findings*”. En: *Transportation Research Record*.
- Kaistinen, J., Nieminen, T., & Summala, H. (2004). “*Driving behavior on split 2+1 lane road*”. *Advances in Transportation Studies*. En: *Transportation Research Record*. Págs: 69-81.
- Lee, S., K., Kim, Y., R., Moon, J., P., Choi, J., S., (2010). “*Operational Analysis of 2+1 Roadway and its Use in Developing Geometric Design Standards in S Korea*”.

Llorca, C., (2015). “*Analysis of passing on two-lane rural roads and proposal of models to improve geometric design and marking*”. En: Universitat Politècnica de València.

Ministerio de Fomento (2016). *Instrucción de Carreteras 3.1-IC: Trazado*.

Monterosso, L., (2015). “*Estudio de la funcionalidad del tráfico en carreteras 2+1 mediante microsimulación*”.

Moreno, A. T., (2015). “*Operational analysis of two-lane highways depending on the distribution and characteristics of their passing zones*”. En: Universitat Politècnica de València.

Pérez Zuriaga, A. M. (2012). “*Caracterización y modelización de la velocidad de operación en carreteras convencionales a partir de la observación naturalística de la evolución de vehículos ligeros*”. En: Universitat Politècnica de València. Págs: 251-296.

Park, B., Fitzpatrick, K., & Brewer, M. (2012). “*Safety effectiveness of super 2 highways in Texas*”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2280(1), 38-50.

Radimsky, M., Matuszkova, R., Kosnovsky, M., Kabes, L., Cepil, J., & Smely, M. (2014). “*Traffic characteristics and accident analysis on the undivided roads with increased number of lanes*”. En: Proceedings of the Second International Conference on Traffic and Transport Engineering (Ictte), 401-409.

Transportation Research Board (2010). *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board.

Weber, R., Irzik, M., & Baselau, C. (2008). “*2+1 Roads - New findings from Germany*”. En: Traffic Engineering and Control, 49(4), 145-151.

Derr, B., (2003). “*Application of European 2+1 Roadway Designs*”. En: National Cooperative Highway Research Program. N° 273.