



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE
VALÈNCIA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

**Máster Universitario en Transporte, Territorio y
Urbanismo**

LUCIA MONTEROSSO

**ANÁLISIS DE LA FUNCIONALIDAD DE UNA
CARRETERA 2+1 MEDIANTE
MICROSIMULACIÓN**

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Director:

Prof. Ing. Alfredo García Carcía

Cotutor:

Ing. Carlos Llorca

Julio 2015

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	4
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE	9
Carreteras 2+1	10
Maniobra de adelantamiento	22
Microsimulación	26
Resumen	35
CAPÍTULO II: OBJETIVOS	37
CAPÍTULO III: HIPÓTESIS	38
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	39
Creación de modelo	39
Calibración del modelo	44
CAPÍTULO V: ANÁLISIS	56
Análisis de escenarios de calibración	56
Aplicación del modelo calibrado	64
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	74
CAPÍTULO VII: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	76
REFERENCIAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1: Detalle de sección tipo para carretera 2+1. Fuente Brewer, Venglar (2010).</i>	10
<i>Figura 2 Posiciones de las cámaras. Fuente Lee, Kim, Moon (2010).....</i>	12
<i>Figura 3. Configuración de la zona de transición para una carretera 2+1. Fuente Lee, Kim, Moon (2010)</i>	13
<i>Figura 4: Detalle de ubicación de la señalización para carreteras 2+1. Fuente Brewer (2003)</i>	14
<i>Figura 5: Tabla para determinar la longitud de la vía de adelantamiento para una carretera con un cierto volumen de tráfico y un cierto porcentaje de vehículos pesados. Irzik (2010)</i>	16
<i>Figura 6: Detalle sección para carretera 2+1 con eliminación del carril para vehículos lentos. Fuente: Radimsky, M. (2014).....</i>	17
<i>Figura 7: Detalle de sección para carretera 2+1 con eliminación del carril del adelantamiento. Fuente: Gattis, J. L. (2006)</i>	18
<i>Figura 8: Reequipamiento de carretera de dos carriles a carretera 2+1. Fuente Cafiso, D'Agoastino, Bak, Kiec (2015).....</i>	19
<i>Figura 9: P_{ac} probabilidad como una función de la densidad ρ para varios valores de p. Fuente: Bentaleb K. (2014)</i>	25
<i>Figura 10: Probabilidad P_{ac} como una función de la densidad ρ para diversos P_d. Fuente: Bentaleb K. (2014).....</i>	25
<i>Figura 11: Configuración geométrica de la carretera 2+1 a representar</i>	40
<i>Figura 12 Configuración geométrica de la carretera 2+1 en Aimsun</i>	42
<i>Figura 13: Parámetros relativos la distancia de visibilidad de las últimas dos secciones dentro del programa informático Aimsun.</i>	43

<i>Figura 14: Configuración geométrica final de la carretera 2+1 con el detector en Aimsun</i>	43
<i>Figura 15: Fotografía de una de las secciones de la carretera 2+1 en Polonia</i>	45
<i>Figura 16: Otra fotografía de una de las secciones de la carretera 2+1 en Polonia</i> ...	46
<i>Figura 17: Configuración geométrica final de los tramos de carretera 2+1 con diferentes longitudes en Aimsun</i>	48
<i>Figura 18: Matriz origen/destino relativa a los coches dentro del programa informático Aimsun</i>	49
<i>Figura 19: Matriz origen/destino relativa a los vehículos pesados dentro del programa informático Aimsun</i>	49
<i>Figura 20: Parámetros relativos a las velocidades de los coches dentro del programa informático Aimsun</i>	50
<i>Figura 21: Parámetros relativos a las velocidades de los vehículos pesados dentro del programa informático Aimsun</i>	51
<i>Figura 22: Variables relativas a la distancia de visibilidad de los coches dentro del programa informático Aimsun</i>	52
<i>Figura 23: Variables relativas a la distancia de visibilidad de los vehículos pesados dentro del programa informático Aimsun</i>	52
<i>Figura 24: Gráfico relativo a los porcentajes medios de vehículos que adelantan en los datos reales</i>	54
<i>Figura 25: Replicaciones dentro del modelo de microsimulación desarrollado en Aimsun y su media</i>	57
<i>Figura 26: Valores resultantes para el flujo de tráfico y para los adelantamientos obtenidos en una simulación dentro del programa informático Aimsun</i>	58
<i>Figura 27: Gráfico relativo a los porcentajes de vehículos que adelantan en las replicaciones en comparación a los datos reales</i>	62

<i>Figura 28: Gráfico final relativo a los porcentajes de vehículos que adelantan en las replicaciones en comparación a los datos reales</i>	63
<i>Figura 29: Matriz origen/destino relativa a los coches en la aplicación del modelo calibrado dentro del programa informático Aimsun.....</i>	65
<i>Figura 30: Matriz origen/destino relativa a los vehículos pesados en la aplicación del modelo calibrado dentro del programa informático Aimsun.....</i>	66
<i>Figura 31: Demanda de tráfico total en la aplicación del modelo calibrado dentro del programa informático Aimsun</i>	67
<i>Figura 32: Valores resultantes para el flujo de tráfico y para los adelantamientos obtenidos en una replicación de la aplicación dentro del programa informático Aimsun</i>	68
<i>Figura 33: Gráfico relativo a los valores medios de los porcentajes de vehículos que adelantan en las replicaciones de la aplicación del modelo calibrado</i>	71
<i>Figura 34: Gráfico relativo a los valores medios de la demora de los vehículos en las replicaciones de la aplicación del modelo calibrado.....</i>	72

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Diseño geométricos de carreteras 2+1 en los países europeos. Fuente Lee, Kim, Moon (2010)</i>	12
<i>Tabla 2: Resumen estadístico del conjunto de datos utilizados para el análisis operativo de tráfico. Fuente Cafiso, D'Agoastino, Bak, Kiec (2015)</i>	19
<i>Tabla 3 Resultados operacionales de tráfico en los sitios investigados. Fuente Cafiso, D'Agoastino, Bak, Kiec (2015)</i>	20
<i>Tabla 4: Resumen estadístico del conjunto de datos utilizados para el análisis operativo de tráfico con parámetros fundamentales por el modelo resaltados</i>	47
<i>Tabla 5: Resumen estadístico del conjunto de datos utilizados para la comparación con los resultados del modelo considerado</i>	54
Tabla 6: Resultados del modelo considerado y su procesamiento para una replicación	59
<i>Tabla 7: Tabla resumen de los datos de interés de las simulaciones</i>	61
<i>Tabla 8: Tabla resumen de los datos medios de las simulaciones</i>	63
<i>Tabla 9 Resultados del la aplicación del modelo calibrado y su procesamiento para una replicación</i>	70
<i>Tabla 10: Matriz de los valores medios de adelantamientos hechos dentro de la aplicación del modelo calibrado para cada hora simulada, dentro del programa informático Aimsun</i>	71

INTRODUCCIÓN

Tanto en las sociedades industrializadas como en aquellas que están en vías de desarrollo, las lesiones por accidentes de tráfico constituyen un problema de salud pública de gran magnitud. Tienen un elevado impacto en términos de mortalidad prematura y de pérdida de salud y calidad de vida en una proporción considerable de la población, frecuentemente joven.

Las lesiones causadas por accidentes de tráfico son la octava causa mundial de muerte, y la primera entre los jóvenes de 15 a 29 años. Las tendencias actuales indican que, si no se tomaran medidas urgentes, los accidentes de tránsito se convertirán en 2030 en la quinta causa de muerte.

Conscientes de que los accidentes de tráfico son un tema de gran importancia social y económica y que no afectan sólo los usuarios de la carretera, es necesario que todos los ciudadanos sean conscientes de que los miles de muertes cada año en las carreteras no pueden simplemente ser considerados como un desastre natural, imparable, pero que, por el contrario, la mortalidad en las carreteras debe ser considerada como una plaga social real.

Como tal es necesario encontrar las soluciones más adecuadas para sanar este problema. La seguridad vial, hasta hora, es considerada una de las principales emergencias nacionales, sólo recuerda que los accidentes en carretera en España:

- son la principal causa de muerte entre los jóvenes en absoluto,
- cada año matan a casi 1.600 personas,
- cada año hieren gravemente cerca de 10.000 personas,
- causan una pérdida económica promedio de 3% del PIB cada año.

En 1990, los accidentes de tráfico en Europa han provocado la muerte de 85.360 personas. Quince años más tarde, en 2005, los accidentes de tráfico causaron la muerte de 50.505 personas, con una reducción de 34.855 unidades, lo que representa el 41%. La mejora de la seguridad vial lograda en los últimos años, es extraordinaria, especialmente teniendo en cuenta el hecho de que en los últimos 10 años el flujo de tráfico de pasajeros aumentó a una tasa promedio de 2 - 2,5% por año y el crecimiento del tráfico de carga anual promedio ha subido cerca de un 3%.

También la reducción de víctimas de accidentes de tráfico en Europa está creciendo. Entre 1990 y 2002, la reducción media anual de víctimas de accidentes de carretera fue de 2,6% y en el período 2003-2005 la tasa anual de reducción aumentó a 4,7% casi el doble del período anterior. Estas reducciones son sin duda debidas a la atención que todos los gobiernos de la UE han dado en los últimos años a la seguridad vial, lanzando una serie de medidas legislativas destinadas a reducir drásticamente el fenómeno.

Todo esto aún no es suficiente y la sociedad sigue necesitando instrumentos cada vez más eficaz y eficiente para la reducción de los accidentes de tráfico.

Esta es la filosofía detrás de la relativamente reciente aprobación por los países, por encima, de la Europa central y del norte, como Suecia, Alemania, Finlandia y Polonia, de una tipología de vías interurbanas innovadora llamada carreteras 2+1. Ya presentes durante muchos años en el patrimonio de carreteras de Estados Unidos, se introdujeron a partir de 1990 también aquí, en el viejo continente, en vista de la mayor seguridad que se declaraba comportasen.

Las carreteras 2+1 caen en una categoría específica de carreteras formadas en total de tres carriles, que constan de dos carriles en una dirección y uno en la dirección opuesta, alternativamente cada varios cientos de metros. Los dos sentidos de circulación se pueden separar o únicamente a través de marcas o por medio de barreras de seguridad especialmente posicionadas mientras el carril adicional en una dirección está diseñado para permitir los adelantamientos de los vehículos más lentos, principalmente los pesados, por los vehículos más rápidos; todo esto para asegurar una menor dispersión de la velocidad en la carretera donde introducimos esta medida de seguridad.

También este tipo de carreteras ha demostrado ser obviamente mucho menos costoso de implementar que las carreteras que se componen de dos carriles en cada dirección o de las autopistas, otro factor este que ha empujado a los países más desarrollados para iniciar la aplicación de forma masiva.

Siendo un nuevo tipo de carreteras, muchos estudios se están llevando a cabo en diversos campos, tanto en establecer la seguridad más efectiva como en encontrar los parámetros más importantes de considerar por el diseño.

Una de las herramientas más eficaces para estudiar las carreteras es, sin duda, el conjunto de todos los programas de microsimulación de flujo vehicular presente en el mercado

hoy; estos programas permiten describir el movimiento de los vehículos individuales y simular el tráfico en su conjunto a través de la interacción de éstos en un preciso trazado.

Si bien calibrados son una ayuda valiosa para la evaluación de la influencia de muchas variables diferentes en el comportamiento de los conductores y para la identificación de los parámetros legislativos y geométricos más significativos de la carretera.

El desarrollo de un modelo de microsimulación es una tarea muy compleja que requiere la disponibilidad de recursos considerables en términos de datos y tiempo; en relación con este tema, los programas disponibles en el mercado no siempre son capaces de simular adecuadamente todos los aspectos del comportamiento de cada conductor y el tráfico en su conjunto.

Aspectos importantes para solucionar esta deficiencia son la calibración y validación de modelos mediante la manipulación de las variables. El primer proceso implica el ajuste de los parámetros que influyen en el modelo con el fin de mejorar su capacidad de simular adecuadamente el fenómeno del tráfico real y para reproducir las características de los usuarios y sus rendimientos. La fase de validación, después de la calibración, consiste en utilizar los parámetros derivados a fin de evaluar su aplicabilidad a otras situaciones modeladas, con el fin de reproducir fielmente algunos de los fenómenos de tráfico real observados.

El presente Trabajo de Fin de Máster nace con el fin de contribuir al estudio de este nuevo tipo de carretera a través de las herramientas informáticas de microsimulación y es parte de un proyecto más amplio que involucra universidades en tres países diferentes: la Universidad Politécnica de Valencia en España, la Universidad de los Estudios de Catania en Italia y la Universidad de Cracovia en Polonia.

Para crear este modelo de microsimulación se ha elegido el programa Aimsun, suministrado en el departamento de Transporte, Territorio y Urbanismo de la Universidad Politécnica de Valencia, y se han utilizado los datos empíricos recogidos en Polonia en el curso de un estudio llevado a cabo por la Universidad de Cracovia.

Basándose en todas estas consideraciones, el propósito de este estudio es recoger la mayor cantidad de datos posible, en la literatura o empíricos, sobre este nuevo tipo de carreteras y luego desarrollar un modelo de microsimulación general, que reproduzca el comportamiento de los conductores el más fielmente posible para determinar las

características y peculiaridades de estas carreteras enfrente de otros tipos y estimar los beneficios de su aplicación.

Para completar este estudio se decidió desarrollar este Trabajo de Fin de Máster de la siguiente manera: Inicialmente se presentarán todos los estudios en la literatura sobre los temas tratados, como las carreteras 2+1 y los programas de microsimulación, a través de los cuales se ha comenzado a comprender los fenómenos investigados, a continuación, se exhibirán los objetivos y las hipótesis que este estudio quiere demostrar y perseguir, por último se irá exhibiendo la metodología aplicada y el sistema de análisis de datos adoptados, para llegar, al final, a las conclusiones y a los posibles futuros estudios sobre este mismo tema.

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE

El estado del arte es una parte muy importante de cualquier estudio científico hecho, independientemente de la materia tratada. Consiste en una revisión profunda y precisa y en la compilación de todo el conocimiento acumulado en un campo concreto en el que se introduce el estudio en cuestión. En definitiva, recoge y analiza todo el conocimiento antes de la fecha de inicio del estudio en consideración y constituye su punto de partida y su base teórica.

Este capítulo, entonces, consistirá en una revisión de todas las fuentes disponibles, la bibliografía existente, compuesta especialmente para artículos de investigación publicados en revistas de especial interés, pasando por libros y hasta llegar a normativas nacionales y extranjeras.

El objetivo será el de estimar el nivel de los conocimientos existentes sobre los diversos temas tratados en este estudio, las carreteras 2+1, la maniobra de adelantamiento y las microsimulaciones. Para ello, por medio de la colección de información hallada en las fuentes disponibles, se va a profundizar los aspectos más importantes, a través del estudio y análisis de las investigaciones ya realizadas en el mismo campo.

Las informaciones incluidas en el estado del arte se dividirán en diferentes grupos dependiendo del tema que se enfrenta.

En primer lugar se analizarán los escritos y estudios sobre las carreteras 2+1, a partir de los que se refieren a los mejores parámetros a considerar en el diseño de estas. También se estudiarán los que tratan de consideraciones sobre los signos y señales y de la seguridad de estos caminos, hasta llegar a análisis de costos y comparaciones con otros tipos de carreteras.

En segundo lugar, vamos a considerar los conocimientos relacionados con las maniobras de adelantamientos, el pilar fundamental sobre el que se basa el funcionamiento de este tipo de carretera, siendo su propio elemento distintivo lo que consiste en la adición del carril central para el adelantamiento, necesario para que los vehículos con mayor rapidez puedan superar a los más lentos.

Por último se redactará una parte relativa a las microsimulaciones y al programa informático que se va a utilizar por este estudio. Se analizará, entre otras cosas, el modelo,

relativo a las carreteras convencionales, que se modificará posteriormente para adaptarlo a las carreteras 2+1.

Por fin, se presentarán conclusiones breves extraíbles de todos estos estudios juntos, para la selección de los objetivos y de las hipótesis de este estudio y para el desarrollo de la metodología utilizada.

Carreteras 2+1

En los últimos años uno de los sectores más investigados fue el relacionado con el aumento de la seguridad vial en todos los ámbitos.

Dado que los volúmenes de tráfico han aumentado en muchas zonas, tanto rurales como urbanas, la demanda de tráfico de la red de carreteras también se ha incrementado. Los volúmenes de tráfico en carreteras de doble sentido y un carril por cada uno de ellos, también se están viendo incrementados, lo cual produce congestión de tráfico que afecta a su vez a la calidad del aire y a la seguridad, llegando a menudo a acercarse a los límites de capacidad de las carreteras. Los vehículos pesados agravan el problema pues los conductores impacientes, realizan en ocasiones adelantamientos con poca distancia visual y en condiciones que no son las óptimas. Dicha problemática puede verse solucionada con la inclusión puntual en la vía de carriles de adelantamiento, es lo que se conoce como carreteras 2+1, las cuales proporcionan algunos beneficios de carreteras con cuatro carriles, dos por sentido, a un menor coste.

En la siguiente figura se muestra la configuración general de un tramo de una carretera 2+1, una configuración que luego se repetirá durante toda la longitud del camino elegido.

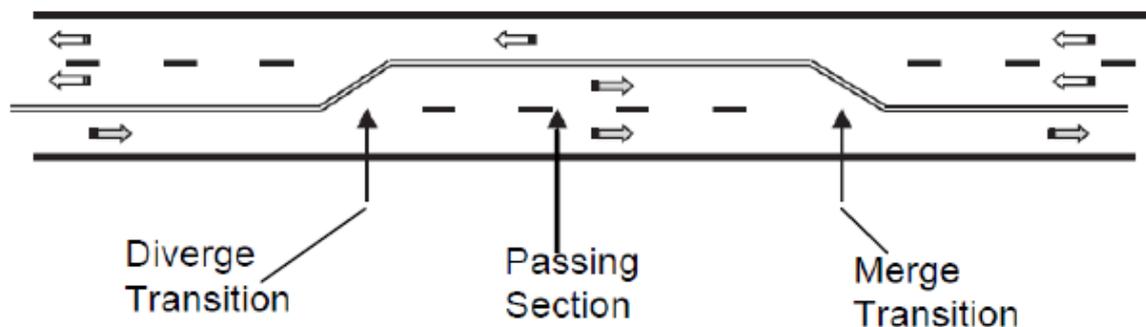


Figura 1: Detalle de sección tipo para carretera 2+1. Fuente Brewer, Venglar (2010).

Se pasa ahora a analizar las muchas publicaciones existentes sobre este tema con el fin de obtener una visión más clara de las características, de las ventajas y de las particularidades de estas formas innovadoras de carreteras.

Un estudio de gran interés en este tema es el que llevaron a cabo Bergh, T. y Carlsson, A., (2000), a petición de la Swedish National Road Administration. Este estudio, basado en un análisis de la red de carreteras de Suecia, tiene como objetivo analizar la evolución desde el punto de vista de la seguridad y la velocidad después de la transformación de numerosas carreteras de un solo carril por sentido en carreteras 2+1 separando sus sentidos con barreras formadas por un cable o sólo a través de las marcas viales, además tiene como objetivo encontrar un diseño que reduzca los accidentes de tráfico dentro de un rango entre 20 y 50%.

Los autores aseguran que la transformación de la carretera convencional de un carril por sentido en una 2+1 resulta ser hasta 3 veces más económica que la configuración 2+2, es decir, dos carriles por sentido.

Después de 1,5 años de observaciones realizadas en los primeros tramos de las carreteras ejecutadas, se ha observado la drástica reducción de accidentes debida a la creación de carreteras 2+1: de hecho, se ha pasado de 21 accidentes mortales en 10 años a ninguno en el año y medio de observación. También las velocidades han aumentado con la introducción de las 2+1, con sólo un 1% de los vehículos circulando a una velocidad inferior a 75 km/h.

Otro estudio muy interesante es lo realizado por Lee, S. K., Kim, Y. R., Moon, J. P., Choi, J. S., publicado en 2010.

Este estudio tiene como objetivo analizar las características de las carreteras 2+1 en los distintos países europeos con el fin de encontrar una configuración óptima internacional y estudiar, al mismo tiempo, las ventajas en términos de funcionamiento y de la seguridad de estas carreteras. En la tabla 1 se muestran las características de las carreteras 2+1 en los diferentes países europeos.

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	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	

Tabla 1: Diseño geométricos de carreteras 2+1 en los países europeos. Fuente Lee, Kim, Moon (2010)

En esta investigación se han considerado datos reales relacionados con la velocidad, el volumen de tráfico y el tamaño de los pelotones de vehículos, lo que se han reunido a través de cámaras de video colocadas al principio y al final del carril de adelantamiento de la carretera en cuestión, como se muestra en la siguiente figura.

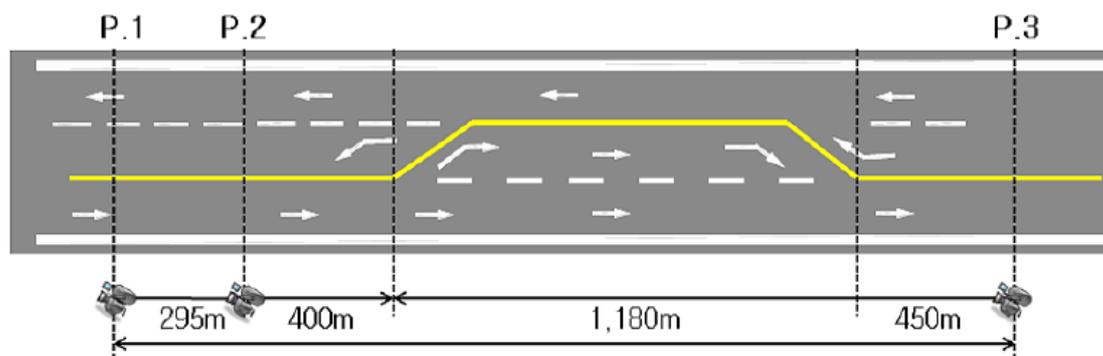


Figura 2 Posiciones de las cámaras. Fuente Lee, Kim, Moon (2010)

En este estudio se ha considerado la definición de pelotones como aquel conjunto de vehículos cuya distancia en términos de tiempo de un vehículo más lento delante de ellos es inferior a 3 segundos.

Este estudio también distingue dos posibles realizaciones del carril de adelantamiento, dependiendo de si la administración querrá transformar la 2+1 en una carretera de cuatro carriles en un momento posterior.

Sus recomendaciones sobre la geometría requieren una longitud mínima de la *diverging area* igual a 90 m, mientras que la *merging area* tiene que ser de aproximadamente 280 m mínimo. Todas las diversas medidas se muestran a continuación en la siguiente figura.

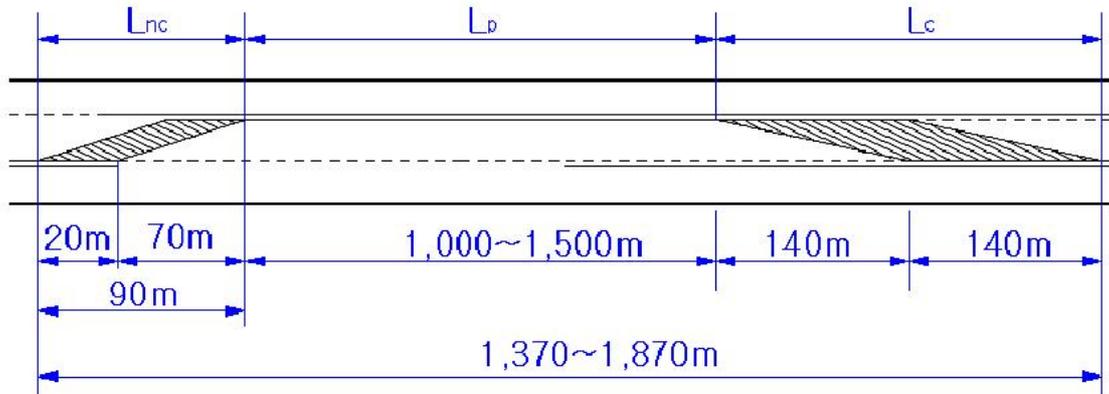


Figura 3. Configuración de la zona de transición para una carretera 2+1. Fuente Lee, Kim, Moon (2010)

Las estimaciones operacionales han demostrado que la velocidad media de una carretera convencional después de la transformación en una carretera 2+1 aumenta hasta unos 19 km/h y que se elimina casi el 10% de la demora. Por fin, en cuanto al efecto sobre la seguridad, se ha estimado una reducción considerable de los accidentes.

Brewer, M. en el año 2003 realiza un estudio y elabora una serie de recomendaciones para la correcta señalización de las carreteras 2+1. Con ellas se pretende hacer de estas carreteras lugares más seguros y eficientes. Estas recomendaciones se muestran a continuación:

- deben localizarse con antelación señales de aviso que indiquen la presencia de los nuevos carriles antes de que estos lleguen. Con ello se pretende advertir al conductor de su presencia. Los autores recomiendan su disposición 2 millas antes,
- debe colocarse una señal que indique que el carril izquierdo es solo de adelantamiento,
- una señal indicando que el carril de adelantamiento está próximo a extinguirse,
- una vez acabada la sección de adelantamiento se deberá situar otra señal que indique la distancia del próximo carril de adelantamiento.

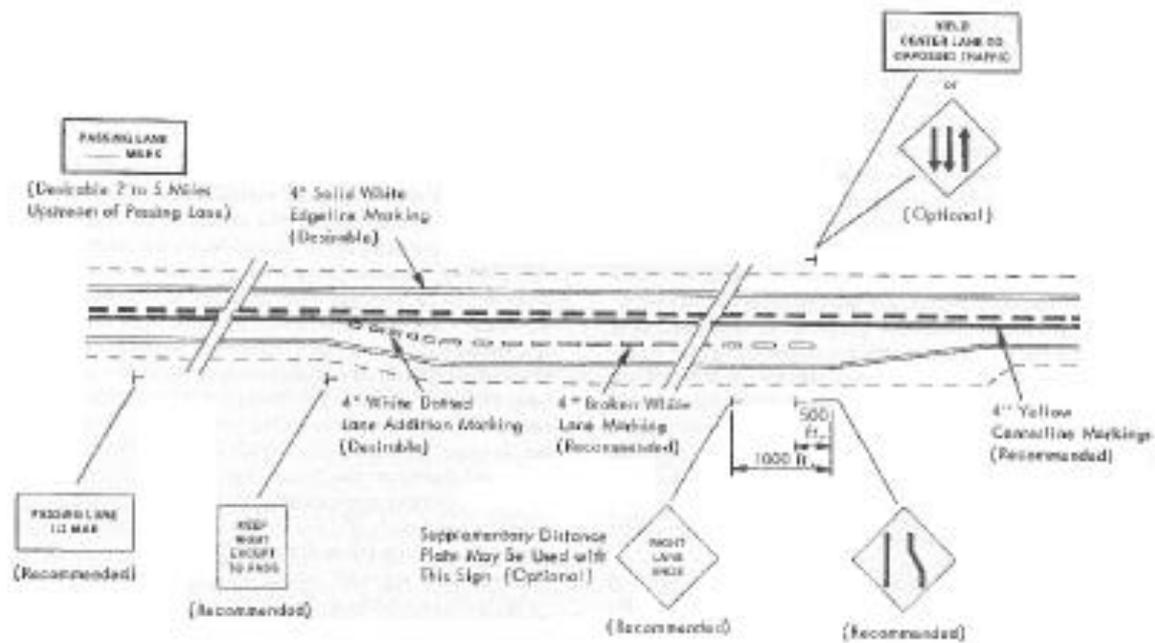


Figura 4: Detalle de ubicación de la señalización para carreteras 2+1. Fuente Brewer (2003)

En el estudio realizado por Ray B. Derr, en el año 2003, se examinan en detalle las características de las carreteras 2+1 construidas en los países europeos, más concretamente en Alemania, Finlandia y Suecia, con el objetivo de encontrar directrices para la aplicación de estas carreteras en los Estados Unidos. Las carreteras con configuración 2+1 se consideran como una importante innovación en favor de la reducción de los accidentes y del aumento de la seguridad y han sido estudiadas in situ por un equipo de investigadores estadounidenses. Se analizaron las características geométricas, señalización, seguridad y las características operativas de tráfico en cada país. Después de haber analizado todos los datos obtenidos, se compararon las características del tráfico europeo con sus correspondientes estadounidenses, obtenidas en casos generales, llegando a la conclusión de que el uso de la 2+1 en el caso de medios o altos volúmenes 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, alcanzando una reducción estimada en el 24% para los Estados Unidos después de la introducción del 2+1.

En la investigación realizada por JL Gattis en el año 2006, se estudió la longitud de los carriles de adelantamiento en carreteras 2+1, después de haber analizado los datos como

densidad de tráfico, longitud de los carriles, velocidad y maniobras de adelantamiento. Sus conclusiones fueron múltiples; entre ellas cabe destacar las siguientes:

- en primer lugar hay que destacar que un volumen alto de tráfico justifica una longitud extra de los carriles de adelantamiento,
- en segundo lugar hay que destacar que para volúmenes bajos las carreteras 2+1 proporcionan un beneficio realmente bajo y más si el terreno es llano y con una alineación recta, destacando que este sistema sí que aporta beneficios para terrenos accidentados y sinuosos,
- por último cita que 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.

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 que resulta 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,
- con un límite de velocidad de 100 km/h,
- con juntas separadas,
- con ligeras pendientes, no más del 2%,
- con 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:

- el volumen de tráfico,
- posición de la vía de adelantamiento,
- porcentaje de vehículos pesados,
- porcentaje de pelotones no resueltos.

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 siguiente figura muestra un ejemplo de cómo determinar la longitud buscada por una carretera conociendo el volumen de tráfico y el porcentaje de vehículos pesados.

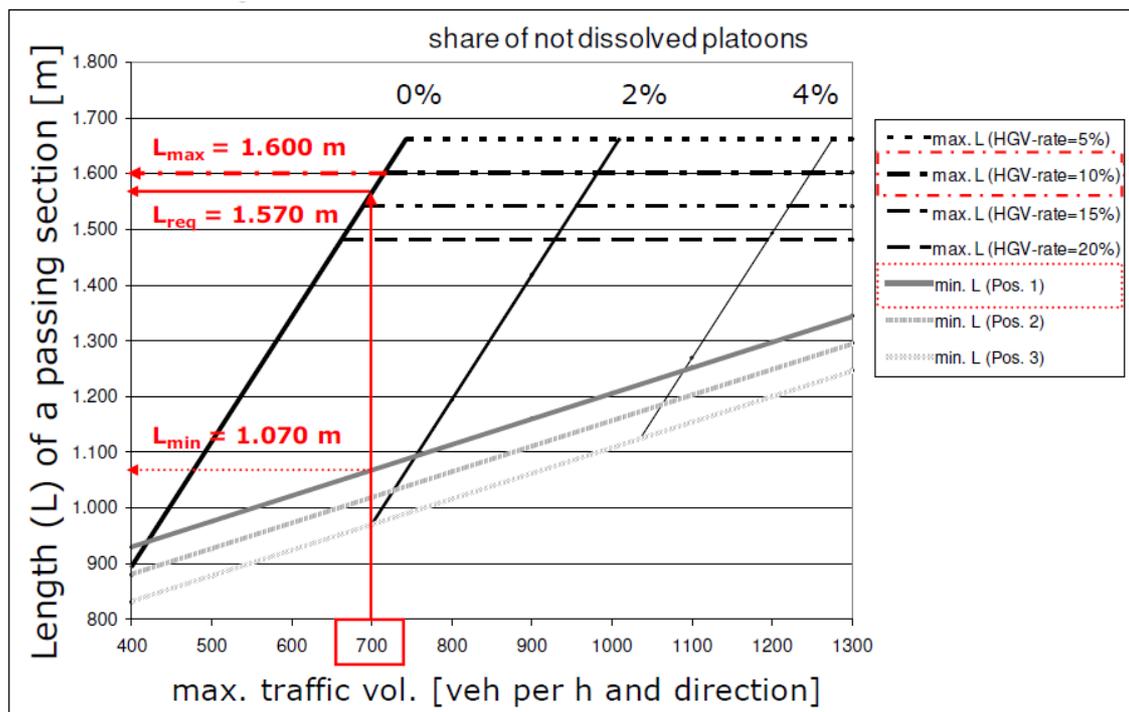


Figura 5: Tabla para determinar la longitud de la vía de adelantamiento para una carretera con un cierto volumen de tráfico y un cierto porcentaje de vehículos pesados. Irzik (2010)

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 seleccionaban el carril en la entrada de la nueva sección

realizando las maniobras de adelantamiento al comienzo de la sección, 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, los camiones grandes tendían a usar el carril de la derecha permitiendo el paso de los vehículos más rápidos. Aproximadamente el 74% de los camiones circulaba por el carril derecho.

La utilización de camiones del carril de la derecha 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.

Otro estudio de gran interés es el llevado a cabo en el año 2014 por Radimsky, M., el cual estudió los efectos en la seguridad de la influencia de la longitud de la sección de adelantamiento, además realizó un estudio sobre la seguridad en función de los dos tipos de reducción de carril existente en carreteras 2+1.

Así pues el resultado de la investigación fue que con un aumento de la longitud del carril de adelantamiento en carreteras 2+1, la tasas de accidentes en la sección de reducción del carril, disminuye. Otra de las conclusiones obtenidas fue que además de la longitud, hay que garantizar que la sección de reducción de carriles se encuentre en una zona con suficiente distancia de visibilidad.

Como ya se ha citado, otro de los puntos de interés es la tipología de reducción del carril; se plantean dos posible escenarios.

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



Figura 6: Detalle sección para carretera 2+1 con eliminación del carril para vehículos lentos. Fuente: Radimsky, M. (2014)

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

La segunda opción descrita es, por lo tanto, la reducción del carril de adelantamiento.

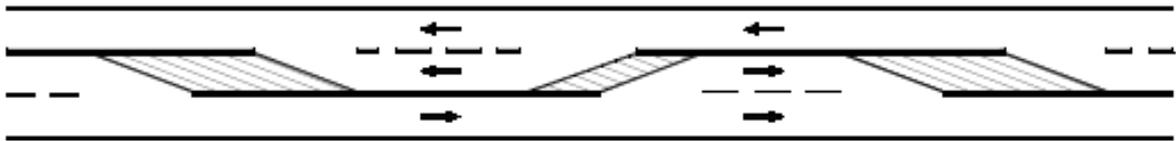


Figura 7: Detalle de sección para carretera 2+1 con eliminación del carril del adelantamiento. Fuente: Gattis, J. L. (2006)

Este tipo de sección aparentemente se mostró más seguro que el citado en primer lugar.

Además en el estudio se observa un aumento de la velocidad en las secciones con carriles de adelantamiento así como un aumento del volumen de tráfico.

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. Ellos citan diversos 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 establece 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 debido al reducido tamaño de la muestra de accidentes en la Super 2 y al número de Super2 incluidas en el análisis, los autores recomiendan que en un futuro se obtengan conclusiones definitivas sobre los accidentes.

Por último, se cita el trabajo “Investigating the influence on safety and traffic performance of 2+1 road sections in Poland”, escrito por Cafiso, S., D’Agostino, C., y Kiec, M., en el año 2015.

El artículo presenta los resultados de los análisis de seguridad vial y de las observaciones de campo sobre las características operativas de carretera 2+1 con secciones cortas en Polonia.

Los análisis se realizaron en la red de carreteras de dos carriles, por una 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 sentido, con arcenes pavimentados a carreteras 2+1, como se muestra en la figura siguiente. Todas las secciones se encuentran en zonas rurales.

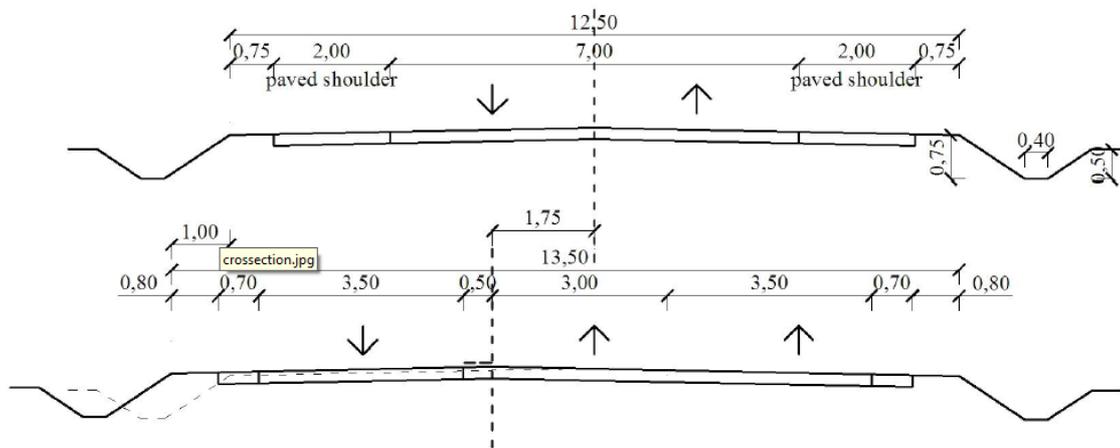


Figura 8: Reequipamiento de carretera de dos carriles a carretera 2+1. Fuente Cafiso, D'Agoastino, Bak, Kiec (2015)

Los análisis operativos se realizaron basándose en observaciones de campo que se realizaron en 5 sitios de prueba seleccionados en las 16 secciones de 2+1 citadas antes.

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

La AADT para estas secciones, con longitud desde 550 m hasta 1000 m, fue casi de 18.000 vehículos/día. Se realizaron observaciones de campo en buenas condiciones meteorológicas para un mínimo de 4-5 horas. Durante las observaciones de campo se registraron alrededor de 12.500 vehículos. El volumen de tráfico estuvo en el intervalo de 417 veh/carril/hora a 863 veh/carril/hora. Todas las secciones se encuentran en terreno llano con pendiente inferior al 3%. Esta etapa de la investigación incluye el uso de neumáticos sensores grabadoras de tráfico y cámaras ANPR.

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

Basándose en los datos obtenidos, se calcularon las siguientes variables: velocidad local, velocidad de marcha con 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 incluyeron la cuantificación de las siguientes variables debida al 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 en el 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
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 3 Resultados operacionales de tráfico en los sitios investigados. Fuente Cafiso, D'Agoastino, Bak, Kiec (2015)

Debido a la presencia de secciones cortas con un 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 la 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 reportada en otros estudios. Esta diferencia puede deberse a un alto porcentaje de vehículos pesados, lo que afecta significativamente las características de los pelotones. Un aumento del 1% de la cuota de vehículos pesados provoca una menor reducción de un 0,5%. Por otra parte, la longitud del carril de adelantamiento tiene un impacto significativo en la reducción de la cuota de pelotones. El análisis de la reducción media de pelotones, para un volumen de tráfico dentro de 552 a 625 veh /h en cada sitio de prueba, indica una dependencia de la longitud del carril de adelantamiento: una cuota de aproximadamente dos veces inferior de reducción para longitudes de 550 y 600 m, medianamente 5,5%, fue observada, mientras que para los 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 marcha en las secciones 2+1 y la velocidad local en el comienzo y el final de cada sección. El análisis mostró que los vehículos en movimiento en el carril de adelantamiento, es decir aquellos que pasan a otros vehículos, tienen una velocidad promedio de viaje superior en un 17,9 km/h en comparación con los vehículos que utilizan el carril de la derecha. Esto afecta a las dispersiones de alta velocidad en el tráfico. La diferencia en la velocidad media antes y después del carril de adelantamiento es en promedio 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 alta proporción de vehículos pesados para los que el límite de velocidad es de 70 km/h.

También se observó la influencia en el número de adelantamientos de la longitud del carril a la izquierda. Se registró una alta cuota de vehículos que pasan (31,6% -52,2%) en las secciones más largas, en comparación con las secciones más corta con una longitud del carril de adelantamiento de 550 m (16,8%). A pesar del porcentaje de los vehículos que pasan, se ha obtenido una baja reducción de los pelotones. El cambio en el tamaño de los pelotones al principio y al final del carril de adelantamiento es ambiguo. Sin

embargo, el número de pelotones en todos los sitios de medición al final de la sección disminuye.

Maniobra de adelantamiento

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

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.

El vehículo adelantante circula ahora a mayor velocidad que el adelantado, por el carril destinado al tráfico en dirección opuesta. Cuando dispone del espacio suficiente por delante del vehículo adelantado regresa al carril propio, donde irá a la velocidad deseada.

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 como el volumen, la composición del mismo y su velocidad de operación,
- factores relacionados con el conductor,
- factores del entorno, como condiciones de luminosidad (diurna y nocturna) y las condiciones meteorológicas.

La maniobra de adelantamiento tiene como finalidad la de reducir las interferencias entre vehículos que circulan a velocidades diferentes a lo largo de una carretera, esto porque es 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 existan 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 niveles de servicio existente en el Highway Capacity Manual. 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.

La maniobra de adelantamiento es muy importante, también, por la seguridad vial, siendo una de las más peligrosas de las que se pueden efectuar en carreteras de calzada única. Aunque la frecuencia de los accidentes asociados a este tipo de maniobras sea inferior a la de otros su gravedad es muy alta, siendo habitualmente las consecuencias fatales.

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.

Se analiza, también, un estudio realizado en 2014 por Khalid Bentaleb, et al. para entender mejor el fenómeno del adelantamiento y la seguridad conectada con ello.

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 una 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.

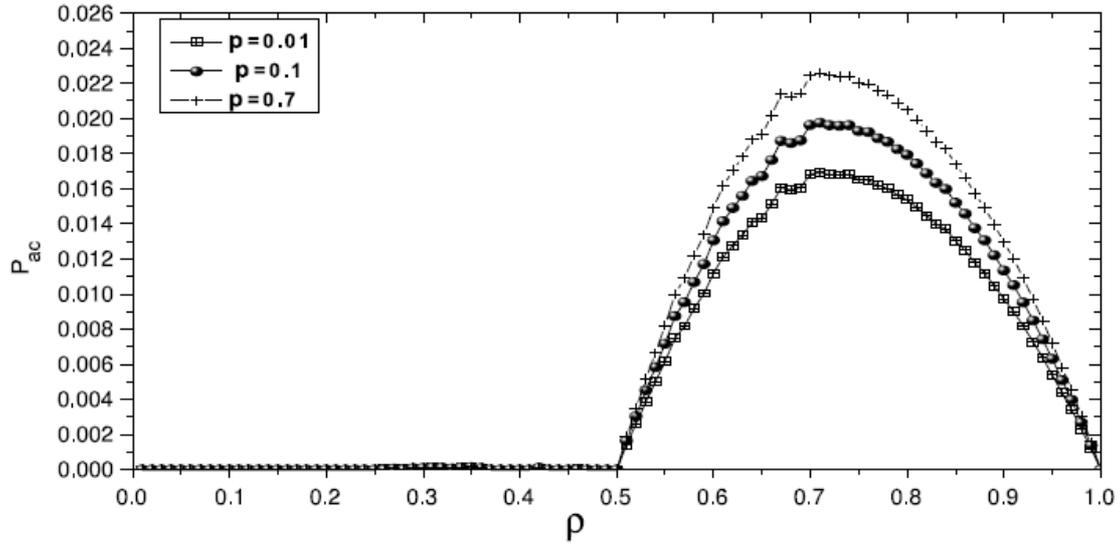


Figura 9: P_{ac} probabilidad como una función de la densidad ρ para varios valores de p . Fuente: Bentaleb K. (2014)

El estudio muestra, sin embargo, 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.

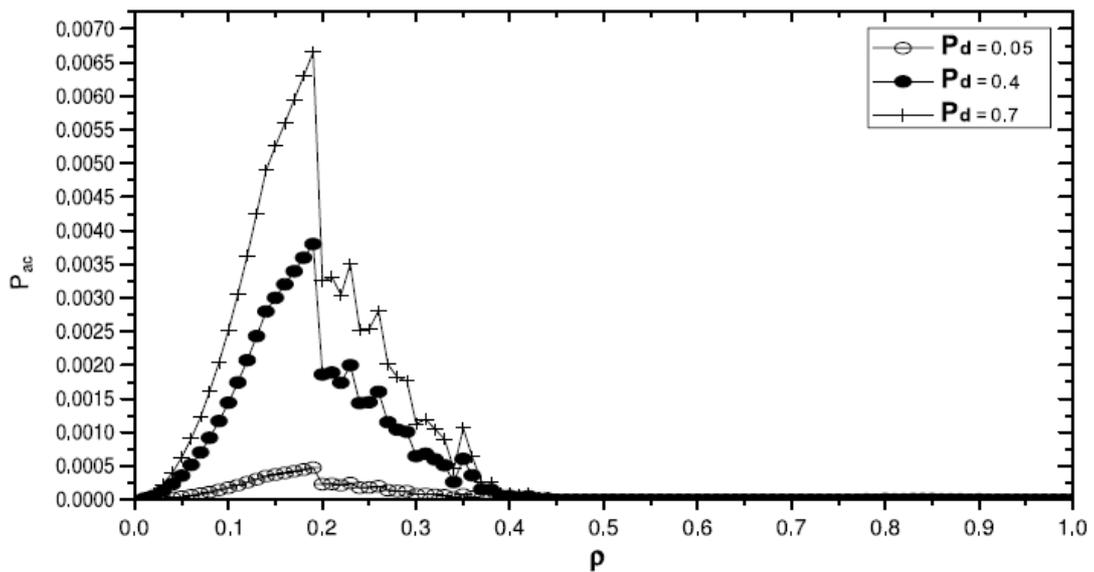


Figura 10: Probabilidad P_{ac} como una función de la densidad ρ para diversos P_d . Fuente: Bentaleb K. (2014)

Microsimulación

Los modelos de microsimulación de tráfico son una de las herramientas más innovadoras actualmente disponibles para los investigadores para el análisis y la evaluación de los efectos sobre la red de transporte por carretera de la elección del diseño o del control del tráfico a escala local.

Además de proporcionar muchos elementos para un análisis cuantitativo detallado, como los datos sobre los cambios en los tiempos de viaje, la longitud de la cola, el consumo de combustible o las posibles emisiones de contaminantes, los modelos de microsimulación permite reproducir y ver de manera realista la circulación de cada vehículo, no sólo la evolución del tráfico en la red de carreteras en su conjunto.

De hecho los modelos de tráfico de microsimulación simulan el comportamiento de cada elemento del flujo de tráfico en la red con sus características de conducción específicas y su origen y destino. Por consiguiente, los modelos microscópicos incluyen diferentes componentes para representar en la manera mejor las maniobras realizadas por los individuos, tales como aceleración, desaceleración o los parámetros del cambio de carril.

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 algunos 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.

Como se mencionó anteriormente, un modelo de tráfico de microsimulación reproduce el comportamiento de cada vehículo que utiliza la red de transporte por carretera simulada con su fuente y destino, el enfoque es de tipo micro ya que, en todo el intervalo de análisis, el comportamiento de cada vehículo individual se simula sobre la base de algoritmos de decisión de comportamiento que establecen de vez en cuando todos los parámetros del viaje, tales como el cambio de carril, la distancia con el vehículo precedente, la introducción en los carriles de adelantamiento o de aceleración y desaceleración.

A cada vehículo son asociadas algunas características dimensionales y de comportamiento; las primeras interesan los parámetros relacionados con los vehículos como la longitud, la anchura, la máxima velocidad o la aceleración, los segundos son los relacionados con la manera de conducir de los conductores, por ejemplo el respeto de los límites de velocidad o la agresividad a la guía.

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),
- la teoría de cambio de carril (Lane Changing),
- la teoría de aceptación de huecos (Gap Acceptance).

Los modelos de seguimiento (Car Following Model) se basan en la idea de que cada vehículo se mueva a lo largo de una carretera tras el vehículo de delante y por tanto su dinámica sea únicamente función de ese vehículo. Esta hipótesis es de modelización matemática simple pero relativamente poco compleja en comparación con la totalidad de los comportamientos que tienen lugar durante la conducción.

En el modelo de coche siguiente en el caso de distancias breves entre los vehículos se analiza el comportamiento del conductor a partir de lo que está adelante.

Los conductores responden a las sollicitaciones que vienen del exterior actuando sobre el freno o el acelerador con el fin de mantenerse dentro de la corriente en condiciones de seguridad. Por lo tanto, si el vehículo delantero frena, el que sigue se adapta. Por simplicidad, en el modelo base se consideran tramos de carretera con un solo carril donde no se permite el adelantamiento.

Una limitación del modelo de coche siguiente consiste en el hecho de que, en general, se utilizan para modelizar carreteras de un solo carril. Sin embargo, a menudo es necesario considerar la posibilidad de llevar a cabo un cambio de carril.

Por esta razón, estos modelos se mejoran con el modelo de cambio de carril (Lane Changing). El modelo se utiliza para simular las distintas situaciones en las que el conductor decida, por diversas razones, de colocarse en un carril diferente a lo de partida. Los tres factores principales evaluados en el proceso de decisión son: la necesidad, la oportunidad y la seguridad del cambio de carril.

El cambio de carril se efectuará si existe un espacio aceptable entre dos coches en el carril de destino, se mide la distancia entre el vehículo posterior que debe realizar adelantamientos y lo que está en el carril adyacente y la distancia entre el mismo y el vehículo en frente que se debe adelantar. Esta distancia debe ser suficiente para no perturbar el flujo de tráfico en el carril de destino.

Los modelos de aceptación de huecos son formulados como problemas de elección binaria en los que los conductores tienen que decidir si aceptar o rechazar un espacio disponible entre dos vehículos en la corriente en que quieren entrar o que deben cruzar, comparándolo 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.

En concreto, por el estudio llevado a cabo, se ha decidido trabajar con el programa informático de microsimulación Aimsun, si bien otros modelos comercializados son VISSIM, Paramics, CORSIM, o TAM Sin embargo, solo algunos de ellos, como Aimsun, CORSIM o TAM cuentan con modelos para adelantamientos en carreteras convencionales. La elección del software Aimsun se debe a sus capacidades para la simulación de adelantamientos, y a la disponibilidad de licencias de software en el departamento en el que se llevó a cabo el estudio.

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. Con miles de usuarios con licencia en organizaciones gubernamentales, consultorías y

universidades en todo el mundo, Aimsun 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.

La última versión, Aimsun 8.1, fue lanzada en Junio de 2015, con más de 2.900 usuarios con licencia en 65 países.

Las principales peculiaridades de este programa informático incluyen 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. El intervalo de simulación puede ser de hasta 0.1 segundos.

AIMSUN, también, tiene un modelo innovador de seguimiento, pero para carreteras de dos carriles (Two Lane Car Following Model), que sirve para forzar los vehículos más rápidos a ponerse en el carril izquierdo para adelantar 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 gráficas con el número de adelantamientos, el porcentaje de vehículos en cola, el porcentaje de tiempo en cola, la velocidad media por tipo de vehículo o la densidad.

Una de las limitaciones de Aimsun es la de no permitir comenzar un segmento de carretera con un porcentaje de vehículos en cola determinado.

El modelo de adelantamiento en carretera convencional que ha sido adaptado para este estudio fue desarrollado por Llorca et al., en el año 2013.

Este estudio se enfocó en el desarrollo de un modelo basado en el deseo, en la decisión y en la ejecución de las maniobras de adelantamiento por los usuarios de la red de transportes.

Los resultados utilizados para este desarrollo derivan de la observación de 1752 maniobras de adelantamiento en 10 diferentes carreteras en España, estudiadas en el proyecto de investigación 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 resultantes 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 final de este trabajo es, por tanto, el desarrollo y la calibración de un modelo de adelantamientos en el programa de microsimulación Aimsun.

Para la recogida de datos reales se ha optado por dos procedimientos. Estas dos formas de recogida de datos son en primer lugar mediante el uso de una metodología estática y en segundo lugar mediante otra dinámica.

La metodología estática consiste en la toma de datos desde un punto fijo de la carretera, en dicho punto serán situadas diversas cámaras con el fin de recabar información sobre el comportamiento de los vehículos en esa zona. En este estudio fueron seleccionadas 24 secciones de adelantamientos en 8 tramos de carreteras diferentes y se colocaron 6 cámaras para recoger imágenes y vídeo de una manera coherente y uniforme en toda la sección.

La metodología dinámica recoge los datos en diversos puntos de la carretera de una manera continuada, mediante el uso de dos vehículos instrumentados con los distintos dispositivos, un GPS, dos cámaras y dos distanciómetros laser situados en la parte frontal y trasera del vehículo, que recogen los datos necesarios para la investigación, como velocidad, imágenes y distancias. El vehículo fue conducido a lo largo de seis segmentos de carretera, cinco de los cuales habían aplicado el método estático con el fin de comparar

los datos de los adelantamientos y para asegurarse de que el método dinámico no hubiera influido en el comportamiento de los conductores de los vehículos observados.

La comparación de los resultados no ha mostrado diferencias entre los dos métodos de recolección de datos.

Para la realización del modelo de microsimulación fueron considerados 14 parámetros diferentes, que se enumeran a seguir:

- 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.

Los primeros diez parámetros afectan a todo el modelo, el undécimo se relaciona con el tipo de vehículo considerado y los tres parámetros restantes con los tramos individuales de la carretera.

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 en la cola (s);
- La diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real (km/h);
- Rango en la 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 esta no sea prohibida. En el caso que otros vehículos estarían 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 respectado 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 adelantando si se podrá completar 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 o su velocidad mayorada de adelantamiento.

Una variable adicional es calculada en este paso:

- Tiempo requerido para abortar: es el tiempo (s) que el vehículo que adelanta requiere para desacelerar y volver a su propio carril sin pasar el vehículo obstaculizador. El punto crítico es el punto donde el tiempo de la maniobra de adelantamiento es igual al tiempo requerido para abortar.

La calibración del modelo de adelantamiento desarrollado en este estudio se ha dividido en dos etapas. Un primer paso ha probado el modelo desde el punto de vista de la conducción individual. Esta parte ha servido para verificar que las decisiones del conductor y las maniobras fueron lo suficientemente cercanas a las observaciones. El segundo paso ha comparado las medidas operacionales entre la realidad y el modelo simulado de cuatro zonas del adelantamiento diferentes y dos volúmenes de tráfico diferentes.

Mediante el 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: este fue el caso de los tres primeros parámetros. El resto de parámetros fueron seleccionados en base al comportamiento observado o a un análisis de sensibilidad.

Para la segunda etapa de la calibración del modelo se realizaron 15 repeticiones.

Para la validación del modelo, que 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.

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

Los resultados de la validación han mostrado 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.

Por el momento, el modelo propuesto no puede aplicarse directamente a carreteras 2+1. Igualmente, no se ha identificado ninguna otra investigación que evalúe las capacidades de un modelo de microsimulación para carreteras 2+1.

Resumen

El estudio y el análisis de todos estos documentos presentados en el estado del arte han proporcionado una visión general de los conocimientos existentes en el campo que se desea investigar en este Trabajo de Fin de Máster.

Las carreteras 2+1 se configuran como una nueva tipología vial más apreciada, tanto para la mayor seguridad que proporcionan respecto a las carreteras de dos carriles, uno para cada dirección, como por el coste reducido en comparación con la creación de carreteras 2+2, es decir con 2 carriles para cada sentido de marcha.

También por el aumento de rendimientos operativos, en términos de reducción de los pelotones de vehículos en cola y de aumento de la velocidad, tanto dentro de la sección con doble carril tanto en la de salida, debido a la posibilidad proporcionada a los vehículos más rápidos de adelantar los más lentos, se ha incrementado el interés por este tipo innovador de carretera.

Se ha analizado, también, la complejidad de las maniobras de adelantamiento en cuanto elemento clave de las 2 + 1 carreteras, siendo el carril adicional creado precisamente para facilitar esta maniobra. Por lo tanto, se consideraron los parámetros básicos y las etapas que las marcan.

Se han obtenido muchos conceptos e informaciones de la literatura disponible sobre el tema de las microsimulaciones. Estas herramientas han sido apropiadas, en muchos estudios, para la representación de las diversas condiciones de tráfico después de las fases de calibración y validación, que constituyen sus pasos básicos.

Particularmente interesante, se reveló el estudio del modelo de microsimulaciones relativas a las carreteras de dos carriles, uno para cada sentido de circulación, realizado para el estudio de los adelantamientos en este tipo de carreteras, creado a través del programa de simulación informático Aimsun. Sin embargo este modelo solo es aplicable para carreteras convencionales y no para carreteras 2+1. Del mismo modo, no se ha identificado ninguna otra investigación, hasta la fecha, que se basara en la aplicación de un modelo de microsimulación específico para carreteras 2+1.

Estas son las bases teóricas de las cuales se empieza el estudio de este Trabajo de Fin de Máster, asegurando un apoyo cognitivo y práctico durante todo el proceso de desarrollo del proyecto.

CAPÍTULO II: OBJETIVOS

En este apartado se van a citar los diversos objetivos que motivan esta investigación y a los cuales se va a intentar dar respuesta con la metodología experimental implementada en este Trabajo de Fin de Máster.

Además de un objetivo general se van a tratar varios objetivos específicos los cuales ayudaran a establecer una serie de metas en el proceso de investigación.

El objetivo general del estudio se coloca dentro de un objetivo mucho más grande, no alcanzables a través de un estudio de esta magnitud, que consiste en mejorar la seguridad vial de la 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 este tipo de carreteras, de tal manera que sea capaz posteriormente de estudiar la seguridad y los mejores puntos reales de aplicabilidad, todo esto con el fin de conocer los parámetros que influyen en la seguridad de las carreteras 2+1 para poder, por ejemplo, analizar posteriormente las causas de los accidentes producidos en estos tramos y poder mejorar las condiciones y la seguridad de los mismos.

Para alcanzar este objetivo muy grande se han planteado objetivos secundarios de menor tamaño que se intentarán desarrollar en los siguientes capítulos de este trabajo. A continuación se exponen los objetivos secundarios elegidos:

- Se desarrollará un modelo básico de microsimulación por las carreteras 2+1, a través del programa informático Aimsun, basado en datos empíricos recogidos en Polonia y estudiados a través de los documentos presentados en el estado del arte;
- Se identificarán las variables que más afectan a la funcionalidad y a las características de funcionamiento de la carretera 2+1 en la simulación;
- Se analizarán los adelantamientos producidos en la sección de 2+1 dentro de la representación y las velocidades de entrada y de salida de este tramo;

CAPÍTULO III: HIPÓTESIS

Gracias al análisis de los documentos incorporados en el estado del arte se han podido formular algunas hipótesis inherentes al estudio desarrollado dentro de este Trabajo de Fin de Máster.

Se ha decidido desarrollar tres hipótesis, las cuales a continuación se detallan:

- El principal factor que caracteriza a las carreteras de tipo 2+1 consiste, sin duda, en la posibilidad concedida a los vehículos más rápidos del flujo de tráfico a adelantar a los más lentos a través del carril de adelantamiento específicamente hecho para ellos.
- Las características operativas y funcionales de este tipo de carreteras son funciones de la longitud del carril de adelantamiento, del porcentaje de vehículos en la cola en la entrada de la sección con el carril adicional, del límite de velocidad impuesta, del volumen de tráfico y del porcentaje de vehículos pesados considerado.
- Gracias a la presencia del carril adicional dispuesto para adelantar, se obtendrá velocidades más altas en la salida de la sección de 2+1 con respecto a las de ingreso.

Estas hipótesis deberán ser comprobadas o no a través del análisis de los resultados finales del estudio realizado.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster se compone de varias partes: la creación del modelo base de microsimulaciones para carreteras 2+1, la elección de los datos a utilizar y la calibración del modelo mencionado mediante los datos elegidos.

En primer lugar, se intentará reproducir el funcionamiento de una carretera 2+1 con un modelo de microsimulaciones desarrollado con el programa informático Aimsun, a partir de un modelo de microsimulación ya hecho, calibrado y validado para las carreteras de dos carriles, uno para cada sentido.

Un vez que se habrá obtenido un resultado aceptable en el movimiento de los coches por la carreteras, se elegirán y estudiarán los datos necesarios para la calibración del modelo. Se tendrán que elegir los parámetros a variar más importantes para la realización de un modelo fiable, que reproduzca en la manera más fiel posible los datos considerados y los parámetros resultantes que tendremos que comparar para comprobar esta fidelidad a los datos de partida.

Por último, se pasará a la calibración del modelo de microsimulación, para ajustar los parámetros de entrada a los datos de partida disponibles. Se harán varias simulaciones, variando las variables del programa que gobiernan el fenómeno del adelantamiento.

Cuando, por fin, se habrán obtenido resultados parecidos a los datos reales se harán diferentes replicaciones del mismo escenario, con los mismos valores de los parámetros y de las variables, y los resultados obtenidos se compararán con los datos tomados en carreteras 2+1.

Creación de modelo

La primera etapa de este estudio es, como ya dicho, la realización de un modelo base de microsimulación que reproduzca el funcionamiento de una carretera 2+1 y el comportamiento de los conductores.

Para la creación de este modelo de microsimulación se ha decidido emplear el programa informático Aimsun que, como ya mencionado en el estado del arte, tiene muchos puntos de fuerza y algunas limitaciones.

Las principales razones que llevaron a esta elección son, sin duda, la presencia del modelo "Two Lane Car Following", que empuja los vehículos simulados a adelantar cuando se cumplan las condiciones seleccionadas, y la posibilidad de utilizar el modelo de simulación ya desarrollado de una carretera con dos carriles, uno para cada dirección, previamente analizado en el estado del arte.

El primer paso para el desarrollo del modelo consiste en la realización geométrica de la carretera 2+1 dentro del programa seleccionado.

Se ha decidido no representar una carretera 2+1 en su totalidad, con la sucesión de carriles alternados para adelantar en uno y en otro sentido de marcha; en cambio se ha concentrado en la modelación de un tronco que comprende una sección de adelantamiento entera más una parte de las dos secciones respectivamente, anterior y posterior. Tampoco se ha querido representar el carril único en la dirección opuesta. La siguiente figura muestra la configuración elegida.

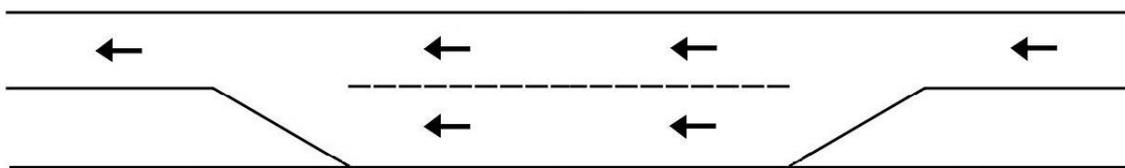


Figura 11: Configuración geométrica de la carretera 2+1 a representar

Se han representado, entonces, tres tramos de carretera de dos carriles cada uno, todos en la misma dirección, que posteriormente han sido conectados por elementos lineales para asegurar la continuidad del flujo de tráfico. De esta manera se ha obtenido un único tronco de carretera formado por tres secciones distintas, con características y parámetros modificables entre ellos. Estos tramos viales representan, respectivamente, la sección de entrada, la sección con el carril de adelantamiento y la sección de salida de la carretera 2+1 que se quiere representar.

Esta representación no sólo tiene sentido desde el punto de vista geométrico, sino que cada sección tiene un propósito específico para la simulación correcta de la carretera.

La sección al principio se utiliza para generar la configuración correcta de los vehículos en cola, pelotones, antes de entrar en la sección que contiene el carril de adelantamiento; de hecho, como se dijo antes en el estado del arte, una de las limitaciones del programa

Aimsun que hemos elegido es que no se pueden decidir arbitrariamente la cantidad y tamaño de los pelotones de vehículos en el flujo de tráfico.

En cuanto a la sección final, por otro lado, sirve para marcar el final de la zona con el carril de adelantamiento e identificar un punto exacto a partir del cual todos los vehículos deberán estar ubicados solamente en el carril de la derecha.

Posteriormente, se han añadido dos nodos, uno para cada lado del tronco de carretera resultante, que representan el flujo de tráfico representado. Para cada pareja de nodos se asocian diversas matrices origen/destino, una para cada tipo de vehículo representable en el programa informático, que representan parámetros modificables dentro de las simulaciones.

En la configuración real de una carretera de 2+1 los troncos inicial y final deberían estar compuestos de tramos de un solo carril en el sentido de marcha, en el otro carril deberá estar el flujo en sentido contrario. Se ha tratado esta diferencia mediante la colocación en estas partes de la carretera de la señalización horizontal propia de la prohibición a adelantar: la línea continua. Con esto se consiguió que los vehículos simulados en estos tramos circulen solo en el carril de la derecha.

Esto es suficiente para la sección de entrada, pero no para la final, ya que algunos vehículos que salen de la sección equipada con el carril de adelantamiento, y colocados precisamente en este carril, no regresan al carril de la izquierda antes de la entrada en el tramo final de la carretera representada.

Para esto se ha tenido que recurrir a un método para simular ficticiamente también el flujo de tráfico en la dirección opuesta.

Para hacer esto, se ha utilizado la construcción presentada en el modelo de microsimulación de carreteras de dos carriles, uno en cada sentido, publicados y analizados previamente en el estado del arte.

En este estudio, como ya se ha visto, se ha recurrido a secciones espejo para simular el flujo en la dirección opuesta a la de la sección principal; en el modelo de las carreteras 2+1, por lo tanto, se ha creado una sección espejo para cada tramo del tronco de carretera considerado.

También estas secciones espejo han sido conectadas entre sí con elementos lineales como el tronco de partida y los dos extremos se han asociado con los nodos de origen y de destino ya presentes.

En la figura siguiente se muestra la configuración geométrica final obtenida en el programa informático Aimsun para el modelo básico.

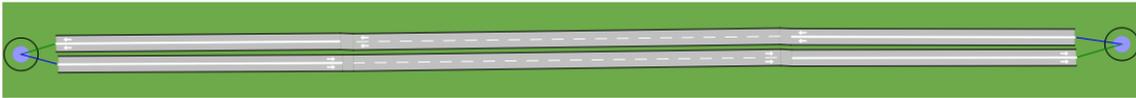


Figura 12 Configuración geométrica de la carretera 2+1 en Aimsun

El valor de la celda de la matriz origen/destino que corresponde al flujo en la dirección opuesta respecto a lo del tramo original se ha establecido igual a cero, ya que no se quiere realmente tener vehículos en sentido contrario en el carril derecho, pero sólo influir en el comportamiento de los conductores en manera que en el último tramo de la carretera representada se pongan sólo en el carril de la derecha.

Se ha introducido, entonces, en las últimas dos secciones, la que tiene el carril de adelantamiento y la de salida, un valor relativamente bajo de la distancia de visibilidad, definida como la distancia hasta el extremo de una sección, donde el modelo del intervalo de acceso mínimo comenzará a ser aplicado, para inducir a los conductores a regresar en el carril de la derecha antes del final de la sección intermedia donde, por otro lado, es permitido adelantar.

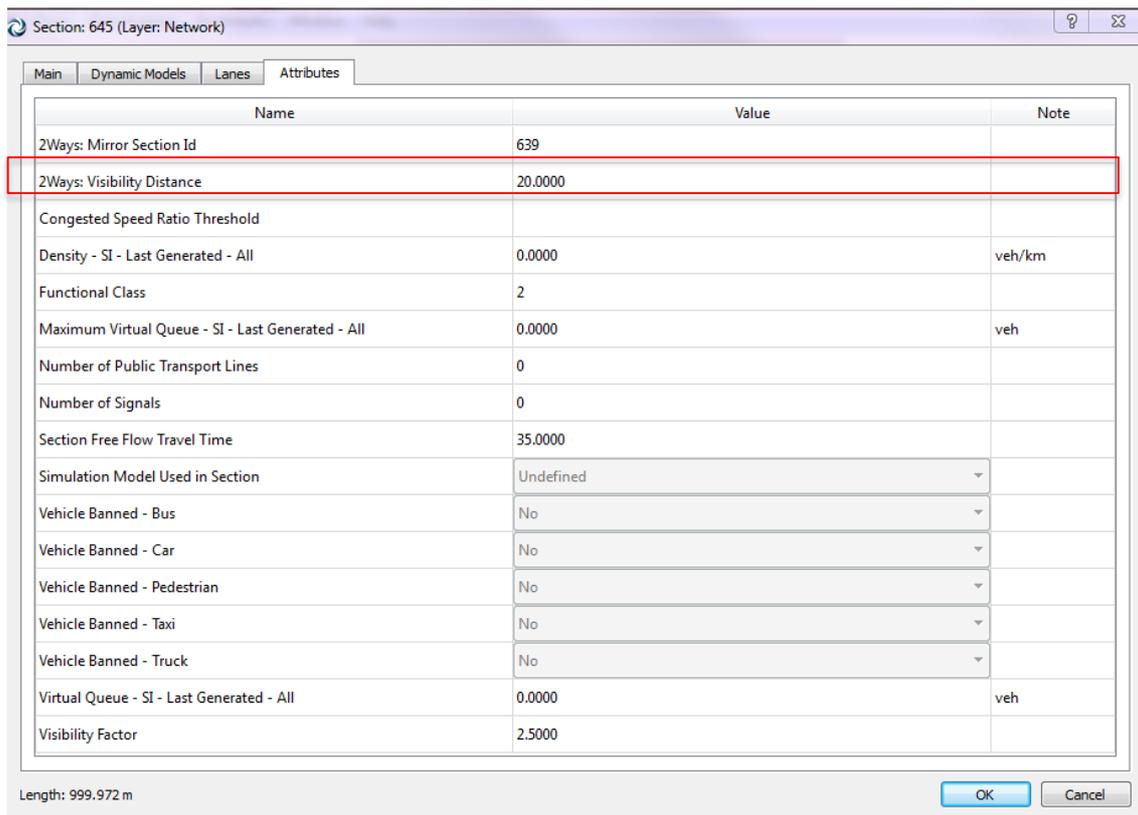


Figura 13: Parámetros relativos a la distancia de visibilidad de las últimas dos secciones dentro del programa informático Aimsun.

Para garantizar que ningún vehículo pase por el carril izquierdo de la última sección se ha puesto en él un detector, que es importante para poder realizar diferentes tipos de adquisición de datos. En la figura siguiente se puede ver como se ha posicionado el detector.

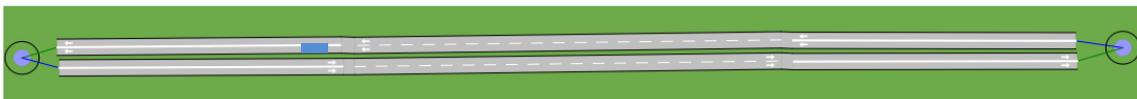


Figura 14: Configuración geométrica final de la carretera 2+1 con el detector en Aimsun

Muy importante para el buen funcionamiento del modelo es que los parámetros propios de las secciones relativos a las secciones originales y las secciones espejo tengan los mismos valores.

Todos los demás parámetros se consideran iguales a los del modelo original creado por una carretera de dos carriles, uno por sentido de circulación.

Dentro del modelo, cada simulación realizada reproduce una hora de tráfico en la carretera considerada. Se decidió no tener en cuenta los primeros minutos de cada simulación a la recogida de los datos resultantes, esto se debe a que en este tiempo se asiste al calentamiento inicial de la simulación hasta la condición de régimen estacionario.

De esta manera se ha creado un modelo básico para la representación de un tronco de una carretera de tipo 2+1.

Calibración del modelo

Se tiene, a este punto, un modelo de tráfico básico en el que se puede trabajar. Sin embargo, sin la calibración adecuada, no es posible estar seguros de que el modelo pueda simular correctamente el comportamiento del tráfico real.

La calibración es un proceso de ajuste de algunos parámetros del modelo para mejorar la capacidad de simulación y la habilidad de la misma en la reproducción de las características de los usuarios y de su rendimiento, a fin de obtener un modelo que sea capaz de reproducir con precisión el funcionamiento y las condiciones locales del tráfico. Por lo tanto, es la fase en la que las relaciones funcionales se cuantifican de manera efectiva.

El objetivo de la calibración es asegurarse de que los valores de las variables consideradas en el modelo sean tales que reduzcan al mínimo la diferencia entre los valores de los parámetros modelados y los obtenidos a partir de datos experimentales recogidos en situaciones reales.

La actividad de calibración es vitalmente necesaria y esencial al fin de poder utilizar cualquier modelo de simulación para las actividades posteriores, como la planificación y la gestión del tráfico. Existen casos muy raros en los que los valores predeterminados de los parámetros que caracterizan un modelo son capaces de permitir una reproducción aceptable del fenómeno analizado.

Son necesarios para la calibración datos reales, para poder comparar con los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas en el modelo creado. Por tanto, se tienen que elegir los datos empíricos a los que hacer referencia en este estudio.

Como este Trabajo de Fin de Máster está dentro de una línea de investigación más amplia, como se mencionó anteriormente, la cual implica tres países diferentes y universidades

(la Universidad Politécnica de Valencia en España, la Universidad de los Estudios de Catania en Italia y la Universidad de Cracovia en Polonia) y no siendo presentes dentro de las redes de carreteras españolas e italianas carreteras pertenecientes al tipo 2+1, se decidió de utilizar los datos empíricos recogidos en Polonia en varios tramos de carreteras de la red nacional.

Estos datos ya se han presentado dentro del estado del arte, en la sección relativa a las características de las carreteras 2+1, pero se muestran ahora con más precisión y en forma más detallada, centrándose en las características y parámetros que se han utilizado para la calibración del modelo considerado y en las limitaciones específicas de estos datos.

El estudio empírico de la accidentalidad se realizará en la red de carreteras de dos carriles en Polonia, uno para cada sentido de marcha, en una longitud total de unos 353 kilómetros, donde, desde el año 2009, se han empezado a introducir secciones de 2+1. Se identificaron 16 secciones de 2+1, por un total de 12,9 km, para el estudio empírico Antes-Después (A/D). Todas las secciones consideradas en el estudio se encuentran en zonas rurales, en la región de Podkarpacki, en la parte meridional de la Polonia. En las fotografías siguientes se muestran ejemplos de las secciones consideradas.



Figura 15: Fotografía de una de las secciones de la carretera 2+1 en Polonia



Figura 16: Otra fotografía de una de las secciones de la carretera 2+1 en Polonia

Los análisis operacionales se realizaron basándose en observaciones de campo que se realizaron en 5 sitios de prueba seleccionados en las 16 secciones de 2+1 citadas antes con 5 longitudes diferentes para el carril de adelantamiento: se han elegido secciones con carril de 550 m, de 600 m, de 700 m, de 800 y de 1.000 m y un ancho de 3 m.

La AADT para estas secciones fue casi de 18.000 vehículos/día. Se realizaron observaciones de campo en buenas condiciones meteorológicas para un mínimo de 4-5 horas. Durante las observaciones de campo se registraron alrededor de 12.500 vehículos. El volumen de tráfico estuvo en el intervalo de 417 veh/carril/hora a 863 veh/carril/hora. Todas las secciones se han encontrado en terreno llano con pendiente inferior al 3%.

El límite de velocidad en todas las secciones tratadas fue de 90 km/h para los vehículos ligeros y de 70 km/h para los vehículos pesados.

El estudio de campo ha documentado el comportamiento del conductor y las operaciones de tráfico al inicio y al final de las secciones de 2+1. También el volumen de tráfico, la clasificación de los vehículos y la velocidad de cada carril de adelantamiento fueron recogidos. Los datos se han utilizado para evaluar los cambios en pelotón y velocidad.

Basándose en los datos obtenidos, se calcularon para cada sección las siguientes variables: velocidad local, velocidad de marcha con 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 incluyeron la cuantificación de las siguientes variables debida al carril de adelantamiento de la 2+1:

- porcentaje de reducción de los pelotones,
- diferencia en la velocidad con el carril de adelantamiento entre las secciones de entrada y de salida,
- porcentaje de vehículos que adelantan,
- cambios en el tamaño de los pelotones.

Una vez seleccionados y analizados los datos empíricos recogidos en las carreteras reales de tipo 2+1 que se utilizarán para la calibración del modelo básico, se ha llegado a la elección de los parámetros a tener en cuenta en el modelado hecho.

Se han elegido como parámetros representativos fundamentales para el correcto funcionamiento de la carretera los siguientes:

- las diferentes longitudes de los distintos carriles de adelantamiento que caracterizan cada sección analizada para la recogida de los datos empíricos;
- los volúmenes medios totales del tráfico medidos para cada sección diferente analizada;
- los porcentajes medios de los vehículos pesados presentes en cada flujo de tráfico relacionado con cada longitud del carril de adelantamiento.

Todos los parámetros enumerados ahora y sus valores se muestran y se resaltan en la tabla siguiente.

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 4: Resumen estadístico del conjunto de datos utilizados para el análisis operativo de tráfico con parámetros fundamentales por el modelo resaltados

Ahora que se han elegido los parámetros a implementar en el modelo básico, se debe generar el escenario de calibración en el programa Aimsun.

En primer lugar se hizo la generación dentro del programa de los cinco tramos de carreteras con las varias longitudes investigadas en la recogida de datos.

Con la misma geometría que se ha descrito anteriormente para el modelo base, se han creado, en el mismo archivo, los troncos de las carreteras con diferentes longitudes de la sección central formada por el carril de circulación normal y otro reservado para el adelantamiento, cada uno con sus propios nodos de origen/destino y sus secciones espejo.

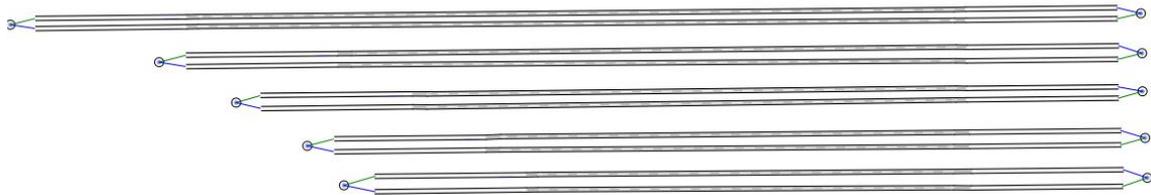


Figura 17: Configuración geométrica final de los tramos de carretera 2+1 con diferentes longitudes en Aimsun

Cada pareja de nodos de origen/destino ha sido introducida automáticamente por el programa en las diversas matrices origen/destino, una para cada tipo de vehículo considerado. Al fin de este estudio se tuvieron en cuenta únicamente a los automóviles y a los vehículos pesados en general. Se han considerados sólo los flujos en la dirección principal, de derecha a izquierda; los flujos relativos a la dirección de marcha de las secciones espejo se han establecido iguales a cero.

Para determinar los valores de cada flujo se ha empezado desde los valores medios que se muestran en la tabla del artículo científico mencionado previamente; estos valores representan el número de vehículos que transitan en total en la carretera considerada en una hora.

Teniendo en cuenta, entonces, los porcentajes medios de los vehículos pesados, siempre reportados en la misma tabla, se obtuvieron los valores medios de los vehículos pesados en el flujo vehicular.

Calculando la diferencia entre el valor medio del flujo total y el valor respectivo de los vehículos pesados se ha obtenido el número de vehículos ligeros involucrados en el estudio para cada tramo representado.

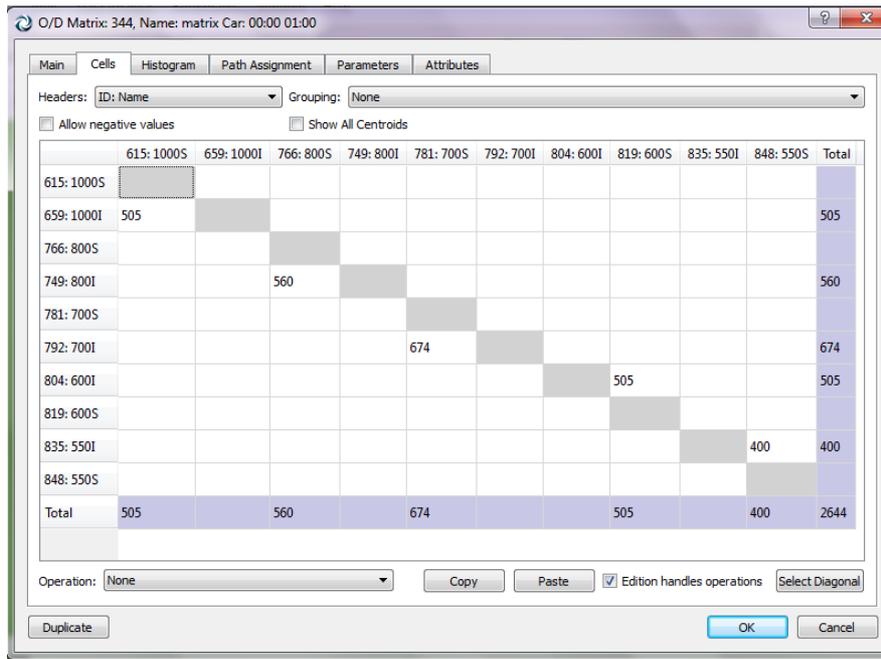


Figura 18: Matriz origen/destino relativa a los coches dentro del programa informático Aimsun

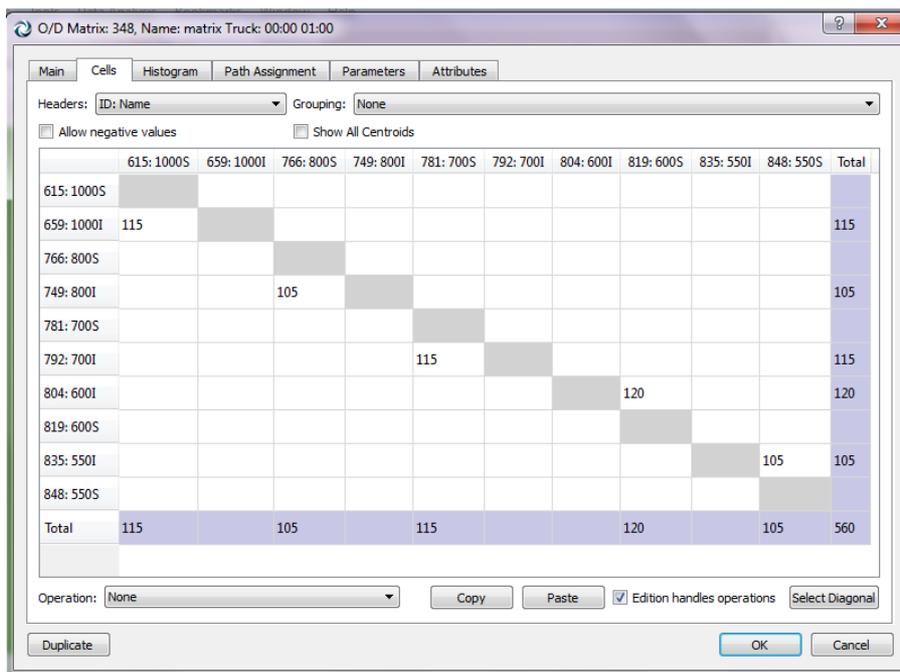


Figura 19: Matriz origen/destino relativa a los vehículos pesados dentro del programa informático Aimsun

Otro factor importante a considerar es el de los límites de velocidad permitidos en las carreteras reales. Como visto antes, estos son diferentes para los dos tipos de vehículos considerados en la recogida de datos empíricos: los coches y los vehículos pesados.

Para hacer esto, dentro del programa se han modificado diversos parámetros relacionados con las velocidades de cada tipo de vehículo, que se muestran a continuación en las siguientes figuras.

Vehicle Type: 53, Name: Car

Main Classes Characteristics 2D Shapes 3D Shapes Experiment Defaults Fuel Emission (QUARTET) Attributes

Name: Car External ID:

Transportation Mode: None

	Mean	Deviation	Minimum	Maximum
Length	4,00 m	0,50 m	3,50 m	4,50 m
Width	2,00 m	0,00 m	2,00 m	2,00 m
Max Desired Speed	108,00 km/h	0,90 km/h	70,00 km/h	130,00 km/h
Max Acceleration	4,00 m/s ²	0,20 m/s ²	3,60 m/s ²	4,40 m/s ²
Normal Deceleration	4,00 m/s ²	0,25 m/s ²	3,50 m/s ²	4,50 m/s ²
Max Deceleration	6,00 m/s ²	0,50 m/s ²	5,00 m/s ²	7,00 m/s ²
Speed Acceptance	1,05	0,20	0,85	1,25
Min Distance Veh	1,00 m	0,30 m	0,50 m	1,50 m
Maximum Give Way Time	10,00 Secs	2,50 Secs	5,00 Secs	15,00 Secs
Guidance Acceptance	100,00 %	0,00 %	100,00 %	100,00 %
Sensitivity Factor	1,00	0,00	1,00	1,00
Minimum Headway	0,00 Secs	0,00 Secs	0,00 Secs	0,00 Secs

Staying in Overtaking Lane: 0,00 %

Undertaking: 0,00 %

Imprudent Lane-Changing: 0,00 %

Sensitivity for Imprudent Lane-Changing: 1,00

Equipped Vehicles: 0,00 %

Cruising Tolerance: 0,80 m/s²

PCUs: 1,00

Maximum Capacity: 4,00 Total Number of Passengers

OK Cancel

Figura 20: Parámetros relativos a las velocidades de los coches dentro del programa informático Aimsun

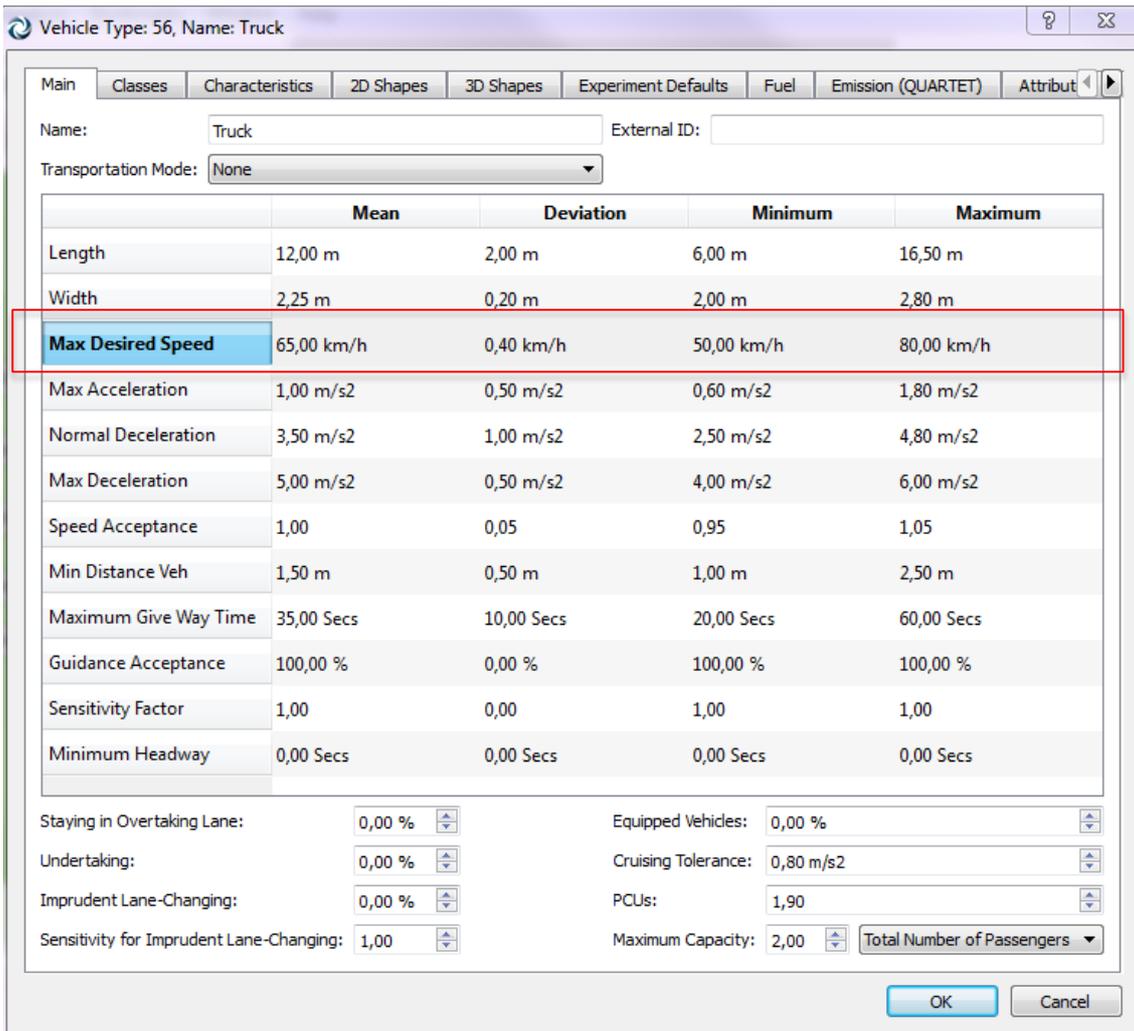


Figura 21: Parámetros relativos a las velocidades de los vehículos pesados dentro del programa informático Aimsun

De esta manera, las velocidades caerán dentro de los rangos permitidos.

A través de estas variaciones de los parámetros se han recreado en el modelo de microsimulación las mismas condiciones de partida obtenidas de los datos empíricos analizados.

A este punto, sin embargo, es necesario considerar las variables inherentes al comportamiento de los vehículos dentro del modelo de simulación, de modo que esto sea capaz de reproducirlo lo más fielmente posible en relación a los datos que se han considerado, de forma cuantitativa.

Las variables seleccionadas para la calibración real del modelo son las relativas a la distancia de visibilidad para los adelantamientos, siendo esta maniobra, como ya se ha dicho, el núcleo del funcionamiento de este tipo innovador de carretera. También en este

caso las variables a considerar son distintas para los diferentes tipos de vehículos presentes en el modelo.

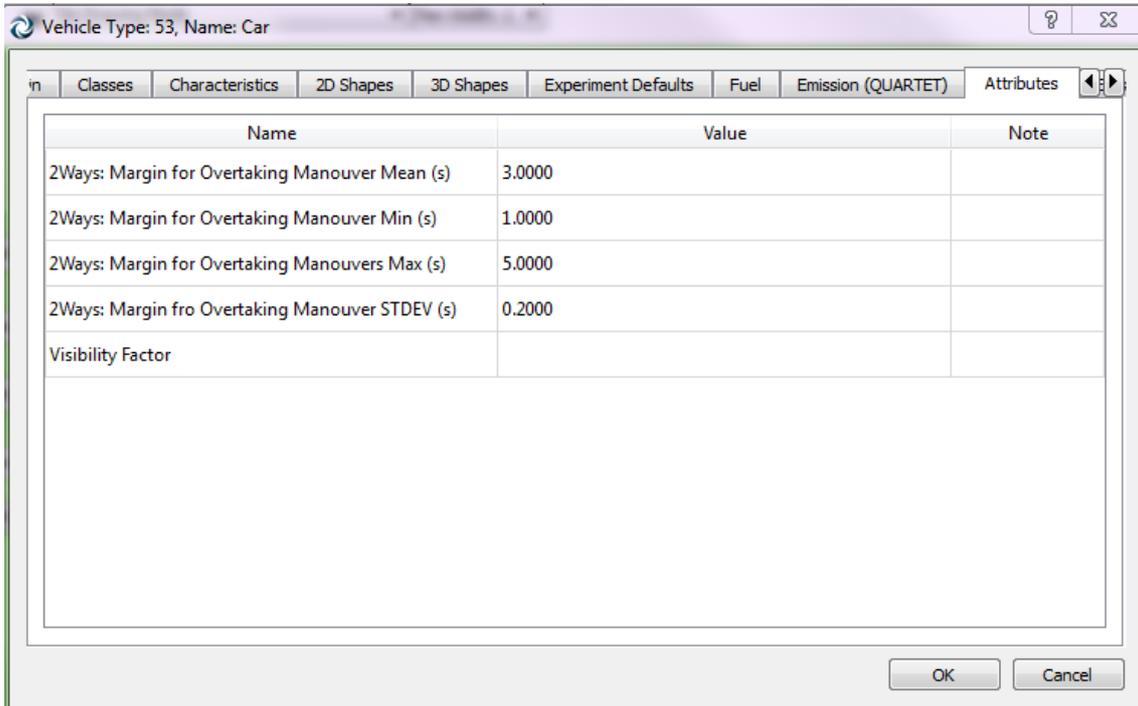


Figura 22: Variables relativas a la distancia de visibilidad de los coches dentro del programa informático Aimsun

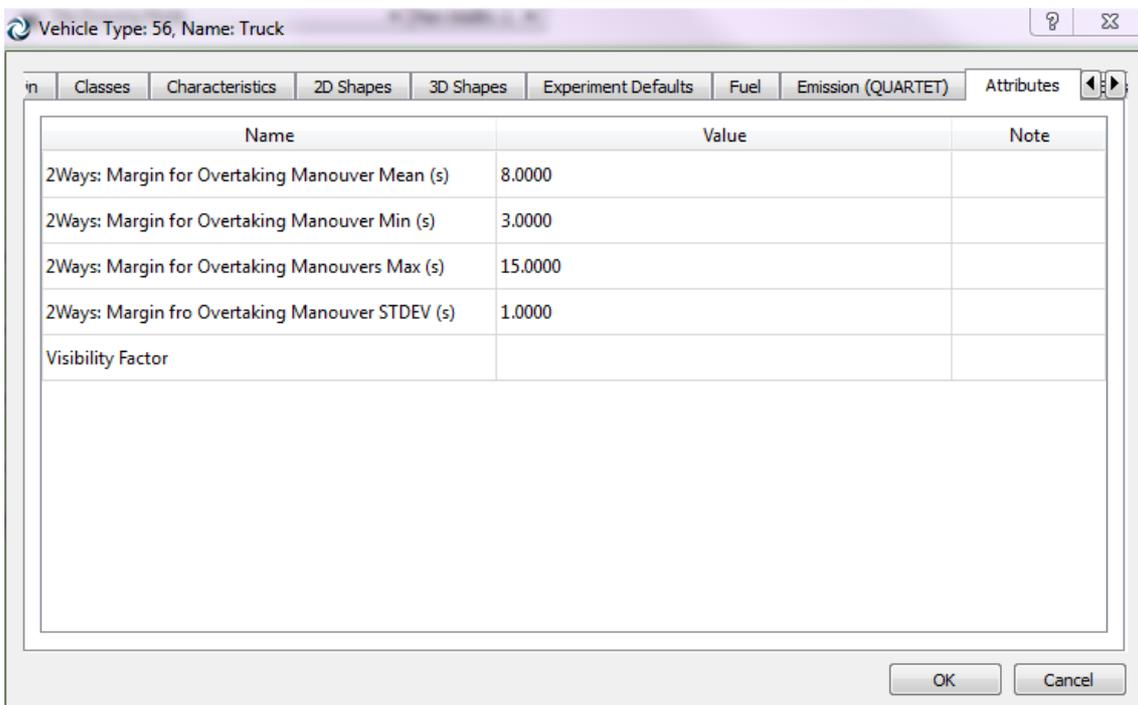


Figura 23: Variables relativas a la distancia de visibilidad de los vehículos pesados dentro del programa informático Aimsun

Para entender plenamente lo que son esos parámetros descritos ahora, se debe referirse al estudio, ya analizado el estado del arte, inherente a la calibración y validación en el programa de microsimulación Aimsun de las maniobras de adelantamiento en las carreteras de dos carriles, uno para cada sentido de la marcha.

En este estudio, que constituye la base teórica para el desarrollo del modelo de microsimulación de las carreteras 2+1, se muestra cómo un vehículo iniciará la maniobra de adelantando si esta se podrá completar antes del final de la zona de adelantamiento y si su duración (PT) será menor que el tiempo de colisión con un vehículo en el sentido contrario, teniendo un margen de seguridad, definido por el parámetro del margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento, diferente para cada vehículo.

Los parámetros que se han mostrado en las tablas anteriores son el parámetro del margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento. Para definir esta variable no se encuentra un único valor, esto porque el programa informático Aimsun genera aleatoriamente, para cada vehículo, un valor diferente elegido dentro de una distribución normal. Las tablas anterior representan en orden la media, el valor mínimo, el valor máximo y la desviación típica de esta distribución.

Para asegurarse de que por estos parámetros se eligieron los valores más apropiados se han debido ejecutar varias simulaciones, como se verá más adelante, y se han elegido los parámetros resultantes de estas simulaciones a ser comparado con los datos empíricos que se tienen.

Como parámetros de comparación se han elegido el porcentaje medio de vehículos que adelantan en la sección que contiene el carril de adelantamiento para cada tramo de carretera considerado; en las tablas y en los gráficos siguientes se muestran, destacándolos.

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 5: Resumen estadístico del conjunto de datos utilizados para la comparación con los resultados del modelo considerado

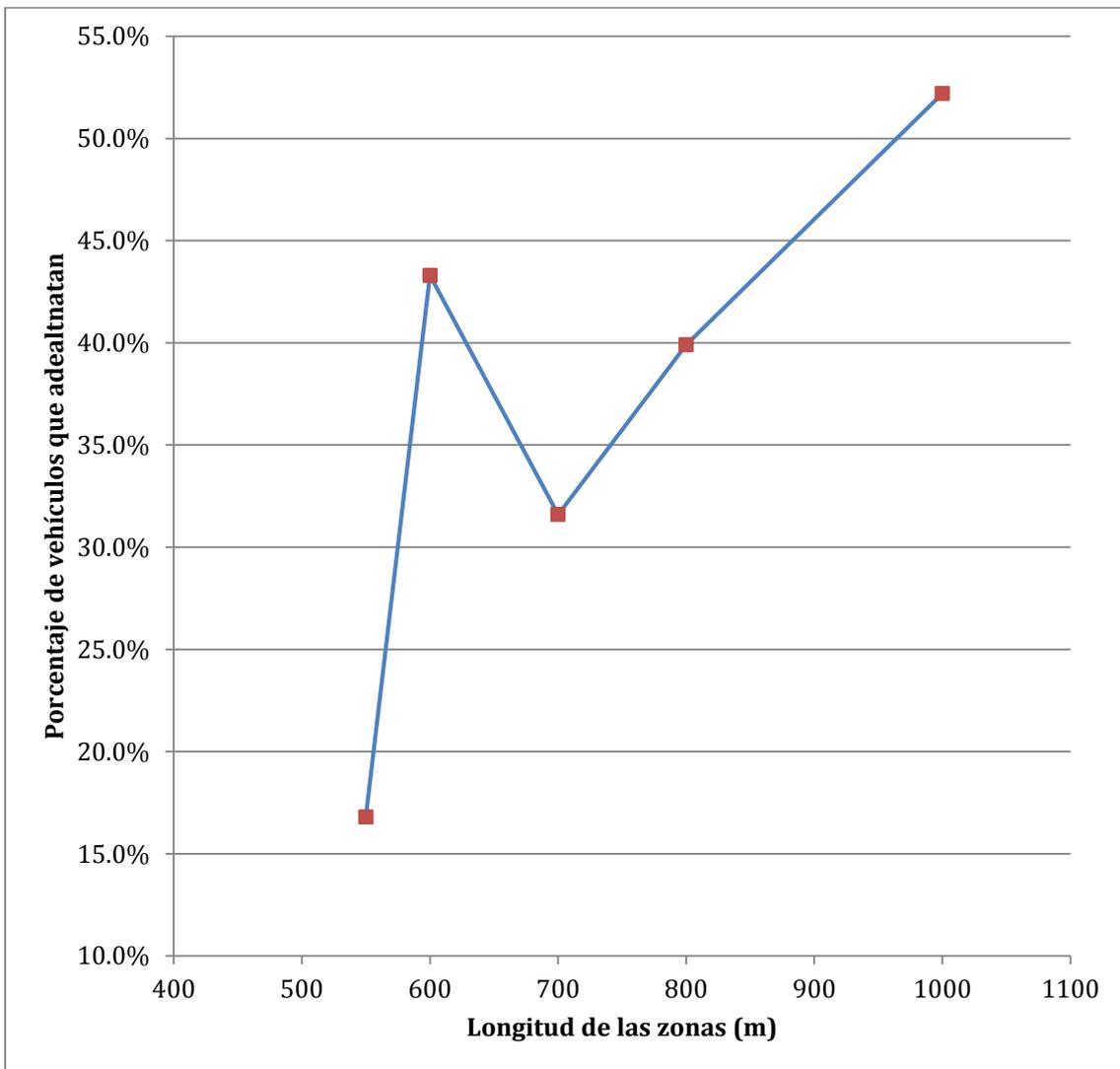


Figura 24: Gráfico relativo a los porcentajes medios de vehículos que adelantan en los datos reales

No se está en posesión de informaciones detalladas sobre el tramo de carretera de 2 + 1 con el carril de adelantamiento con una longitud de 600 m, por lo que no se es capaces de explicar cómo los datos relativos al porcentaje de vehículos que adelantan sea tan elevado

respecto a los otros casos. Podría ser una configuración diferente de la sección considerada respecto a las otras, o podría estar relacionada con diferentes condiciones de entrada en la sección o, simplemente, la colocación de la carretera en sí podría ser la motivación de datos tan diferentes de los demás.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS

Se ha decidido dividir en dos distintos sub-capítulos el capítulo relativo el análisis del modelo creado.

En la primera parte se irá a exponer el análisis del modelo obtenido con el propósito de verificar la buena calibración hecha; se describirán las simulaciones realizadas y los resultados obtenidos en comparación con los datos reales con gráficos y tablas.

En la segunda parte, se ha decidido presentar una pequeña aplicación de modelo calibrado, cambiando sólo los parámetros relacionados con el flujo de tráfico, esto para ver si existen otras variables que afectan el comportamiento del tráfico además de las que se han considerado y cambiado en el capítulo anterior. Incluso en este caso, se ha hecho uso de gráficos y tablas, aunque los resultados no han sido comparados con datos reales.

Análisis de escenarios de calibración

Una vez que se han cambiado todos los parámetros y las variables de interés del modelo de microsimulaciones creado con valores cercanos a los de los datos reales y con valores razonables para una correcta reproducción del fenómeno, se ha pasado a hacer el análisis de los resultados del modelo, a través de la comparación con los datos reales recogidos in situ.

Para obtener resultados válidos del modelo, sin embargo, no se puede hacer referencia a una sola simulación; como en un modelo de microsimulación, la mayoría de las variables de entrada son valores aleatorios se recurre a las replicaciones: simulaciones del escenario de calibración cada vez con valores diferentes de las variables de entrada, tomados dentro de distribuciones de frecuencias caracterizadas de los valores elegidos previamente.

Con el fin de caracterizar el comportamiento del sistema, es necesario simular un cierto número de repeticiones, cada una con valores diferentes de las variables del modelo. Cuanto mayor sea la variabilidad del fenómeno que se quiere reproducir, más alto será el número de repeticiones necesarias para estimar su promedio fielmente.

En el caso específico de este Trabajo de Fin de Máster se ha establecido un número de repeticiones igual a 15, lo que significa que se tendrán 15 diferentes resultados alrededor de los valores impuestos por cada variable o parámetro que se consideran para cada tramo representado en el modelo.



Figura 25: Replicaciones dentro del modelo de microsimulación desarrollado en Aimsun y su media

Para cada simulación realizada el programa genera tablas y gráficos con muchas variables diferentes para cada sección y para cada nodo representados en el modelo, los datos resultantes se agrupan en intervalos de 15 minutos.

Si se fija en las secciones, se pueden obtener varios datos, lo mas importantes son:

- número de vehículos que pasan a través de la sección,
- tiempo de retardo,
- densidad,
- flujo,
- número de cambios de carril,
- número de vehículos parados,
- velocidades,
- tiempo de parada,
- tiempo de viaje.

Los datos más relevantes de este estudio son, como ya se ha dicho, los números de cambios de carril que se han producido durante las simulaciones.

Después de haber hecho todas las 15 repeticiones, se ha pasado a la recogida y disposición de los datos resultantes de los adelantamientos en referencia al volumen de tráfico en cada tramo.

La siguiente figura muestra la tabla generada por el programa Aimsun para una de las secciones centrales del modelo para una replicación.

	Count - Replicación 707 - All (veh)	Number of Lane Changes - Replicación 707 - All
00:15:00	161,00	1,13
00:30:00	137,00	1,07
00:45:00	151,00	0,97
01:00:00	165,00	1,22
Aggregated	614,00	4,39

U	Um	Us	Uc
0,99	1	0,0049	3,2e-05

Length: 999.972 m

Figura 26: Valores resultantes para el flujo de tráfico y para los adelantamientos obtenidos en una simulación dentro del programa informático Aimsun

Todas estas tablas han sido importadas en el programa informático Excel, donde los datos se han reorganizado y ampliado teniendo en cuenta, también, el porcentaje de adelantamientos generados en relación con el volumen de tráfico para cada replicación para cada tramo.

En la siguiente imagen es posible ver un ejemplo de las tablas resultantes que se han creado para cada simulación. Se han agregado los intervalos de 15 minutos en valores horarios, para la comparación con los datos existentes en el estudio de Polonia.

Replicación 707			
L=1000			
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.
00:15:00	161	1,13	91
00:30:00	137	1,07	74
00:45:00	151	0,97	74
01:00:00	165	1,22	101
Agregado	614	4,39	
		Tot Adel. 340	% Tot Adel. 55%
L=800			
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.
00:15:00	179	0,69	62
00:30:00	176	0,85	75
00:45:00	170	0,84	72
01:00:00	169	0,66	56
Agregado	694	3,04	
		Tot Adel. 265	% Tot Adel. 38%
L=700			
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.
00:15:00	178	0,61	55
00:30:00	216	0,66	72
00:45:00	199	0,53	53
01:00:00	199	0,48	48
Agregado	792	2,28	
		Tot Adel. 228	% Tot Adel. 29%
L=600			
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.
00:15:00	161	0,39	32
00:30:00	160	0,53	43
00:45:00	143	0,42	31
01:00:00	171	0,41	36
Agregado	635	1,74	
		Tot Adel. 142	% Tot Adel. 22%
L=550			
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.
00:15:00	144	0,38	28
00:30:00	139	0,37	26
00:45:00	125	0,34	22
01:00:00	106	0,34	19
Agregado	514	1,42	
		Tot Adel. 95	% Tot Adel. 18%

Tabla 6: Resultados del modelo considerado y su procesamiento para una replicación

Se han creado 15 tablas con esta estructura, una para cada replicación y, después una tabla única, que se muestra a continuación, con todos los datos para posibilitar la representación gráfica.

Rep.	Long.	% Pesados	Tot. Vehi.	Tot. Adel.	% Tot Adel.
707	1000	18	614	340	55%
	800	16	694	265	38%
	700	16	792	228	29%
	600	17	635	142	22%
	550	21	514	95	18%
886	1000	18	669	391	58%
	800	16	647	259	40%
	700	16	789	217	28%
	600	17	567	149	26%
	550	21	489	82	17%
887	1000	18	595	341	57%
	800	16	651	250	38%
	700	16	849	261	31%
	600	17	528	134	25%
	550	21	672	141	21%
888	1000	18	595	323	54%
	800	16	659	259	39%
	700	16	780	255	33%
	600	17	596	158	27%
	550	21	525	110	21%
889	1000	18	636	318	50%
	800	16	657	263	40%
	700	16	754	263	35%
	600	17	646	155	24%
	550	21	525	108	21%
890	1000	18	660	326	49%
	800	16	652	250	38%
	700	16	816	243	30%
	600	17	608	126	21%
	550	21	518	97	19%
891	1000	18	590	329	56%
	800	16	723	275	38%
	700	16	837	244	29%
	600	17	672	176	26%
	550	21	459	100	22%
892	1000	18	618	339	55%
	800	16	650	271	42%

Rep.	Long.	% Pesados	Tot. Vehi.	Tot. Adel.	% Tot Adel.
	700	16	854	231	27%
	600	17	596	135	23%
	550	21	480	105	22%
893	1000	18	594	322	54%
	800	16	646	260	40%
	700	16	766	242	32%
	600	17	640	163	25%
	550	21	506	105	21%
894	1000	18	630	357	57%
	800	16	702	296	42%
	700	16	774	215	28%
	600	17	617	158	26%
	550	21	515	104	20%
895	1000	18	616	302	49%
	800	16	650	229	35%
	700	16	799	238	30%
	600	17	649	158	24%
	550	21	564	104	18%
896	1000	18	645	310	48%
	800	16	657	281	43%
	700	16	804	229	28%
	600	17	603	148	25%
	550	21	493	90	18%
897	1000	18	626	309	49%
	800	16	665	240	36%
	700	16	838	219	26%
	600	17	645	150	23%
	550	21	515	107	21%
898	1000	18	615	319	52%
	800	16	670	265	40%
	700	16	787	221	28%
	600	17	609	158	26%
	550	21	525	110	21%
899	1000	18	619	335	54%
	800	16	663	265	40%
	700	16	838	235	28%
	600	17	622	147	24%
	550	21	517	108	21%

Tabla 7: Tabla resumen de los datos de interés de las simulaciones

Luego se han representado los valores de los porcentajes de adelantamiento para cada longitud del carril dedicado para adelantar en el mismo gráfico en el que se habían representado anteriormente a los valores extraídos de las tablas de los datos reales usados.

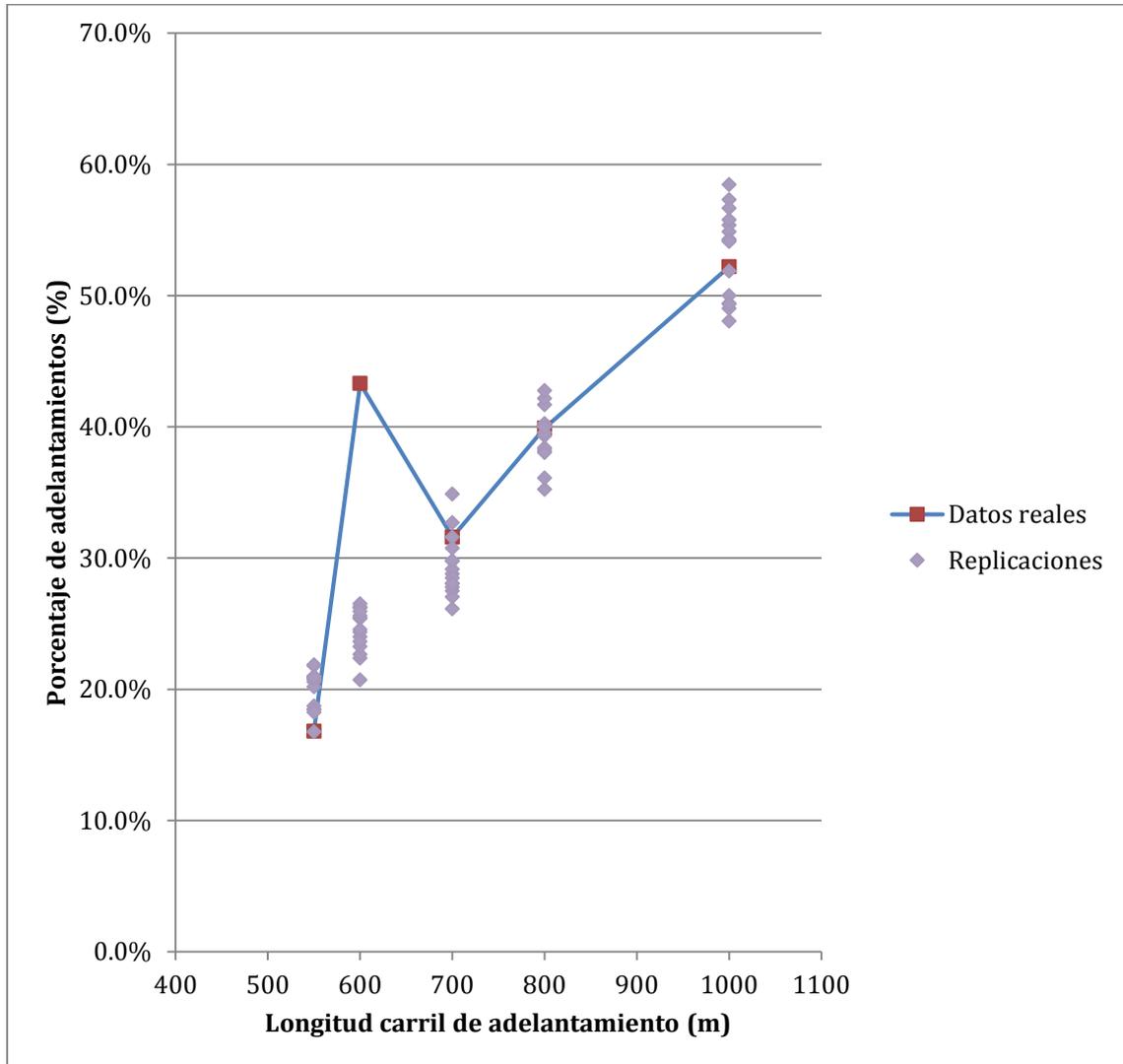


Figura 27: Gráfico relativo a los porcentajes de vehículos que adelantan en las replicaciones en comparación a los datos reales

El último paso fue sobre el cálculo de las medias de los datos de las diferentes repeticiones realizadas, con la realización de una tabla con estos valores medios que se han insertado después en el mismo gráfico mostrado antes para una comparación adicional.

	Media Tot. Vehi.	Media Tot. Adel.	Media % Adel.
1000	621,47	330,73	53,2%
800	665,73	261,87	39,3%
700	805,13	236,07	29,4%
600	615,53	150,47	24,5%
550	521,13	104,40	20,0%

Tabla 8: Tabla resumen de los datos medios de las simulaciones

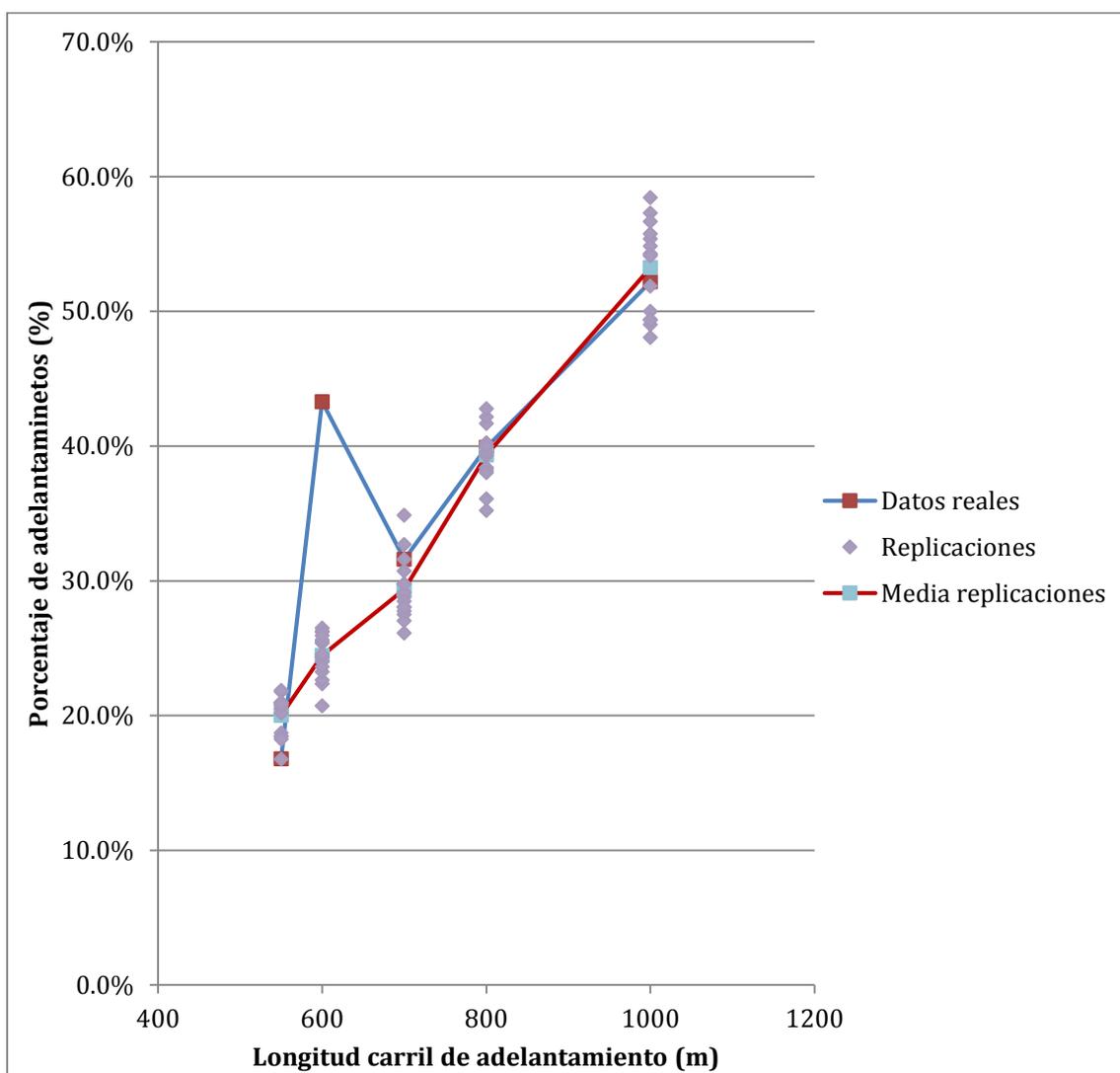


Figura 28: Gráfico final relativo a los porcentajes de vehículos que adelantan en las replicaciones en comparación a los datos reales

Los resultados obtenidos del modelo se aproximan mucho a los datos reales, sin considerar, pero, el valor bastante extraño relativo al tramo con carril de adelantamiento de 600 m del cual ya se ha discutido anteriormente.

Aplicación del modelo calibrado

Una vez calibrado el modelo hecho con la obtención de resultados lo suficientemente cercanos de los datos reales considerados desde el principio, se ha intentado probar el programa en condiciones diferentes de las de inicio para ver si se pudieran identificar otras variables que influyen en el tráfico, hasta ahora no consideradas.

Las variables que se han elegido para variar son las relacionadas con el flujo de tráfico; se ha decidido, de hecho, mantener la misma geometría del modelo de partida, con cinco tramos distintos con diferentes longitudes del carril de adelantamiento, y poner para cada tramo de carretera el mismo flujo de tráfico. Esto para verificar si el flujo influye o no en los resultados obtenidos por el modelo, es decir, en el funcionamiento de los distintos tramos de carretera.

También en este caso los resultados que se van a comparar son los relacionados al adelantamiento, en concreto el número de adelantamientos totales y el porcentaje de adelantamientos hechos, para cada flujo para cada tramo de la carretera.

Para modificar realmente la demanda de tráfico en el programa informático Aimsun se ha generado un nuevo escenario de simulación variando la matriz origen/destino; se han siempre mantenido iguales a cero los flujos relativos a la dirección de las secciones espejo, mientras que para los restantes se han fijado los valores que se pueden ver en la siguiente figura, diferentes como antes para vehículos ligeros y pesados.

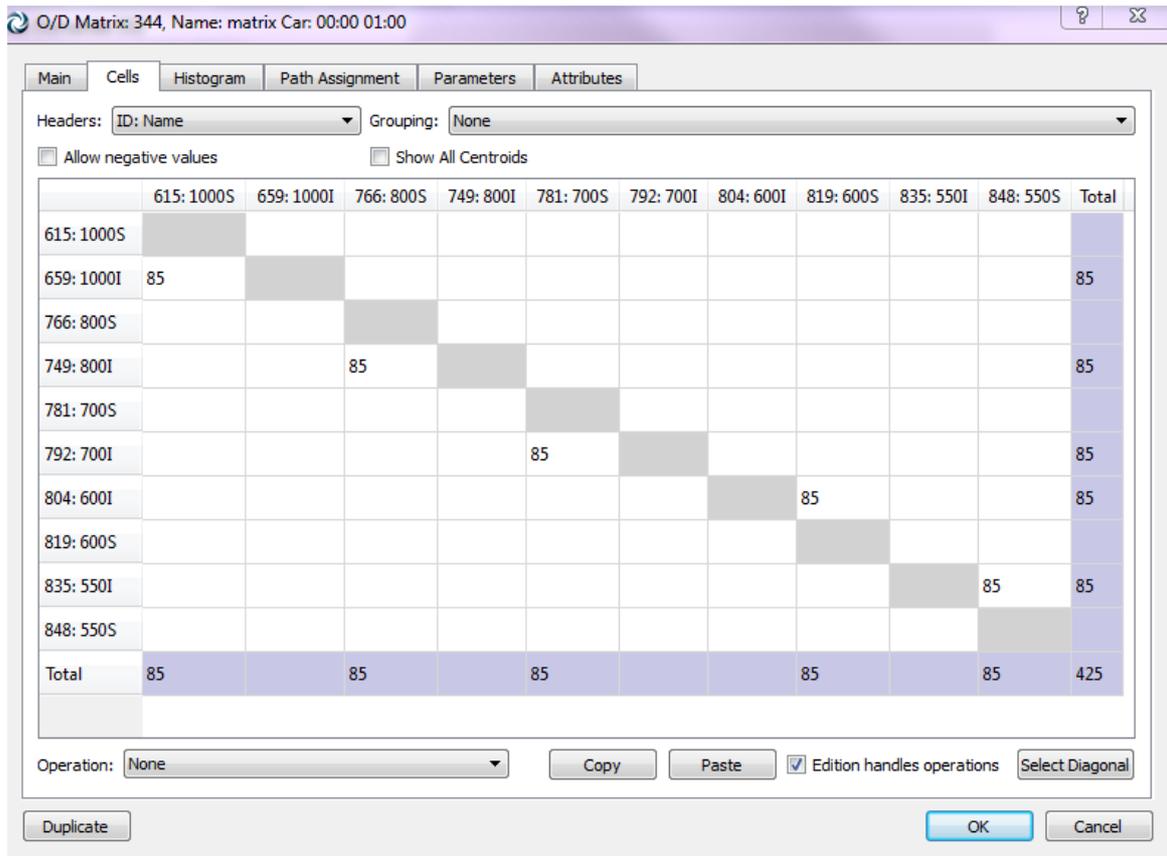


Figura 29: Matriz origen/destino relativa a los coches en la aplicación del modelo calibrado dentro del programa informático Aimsun

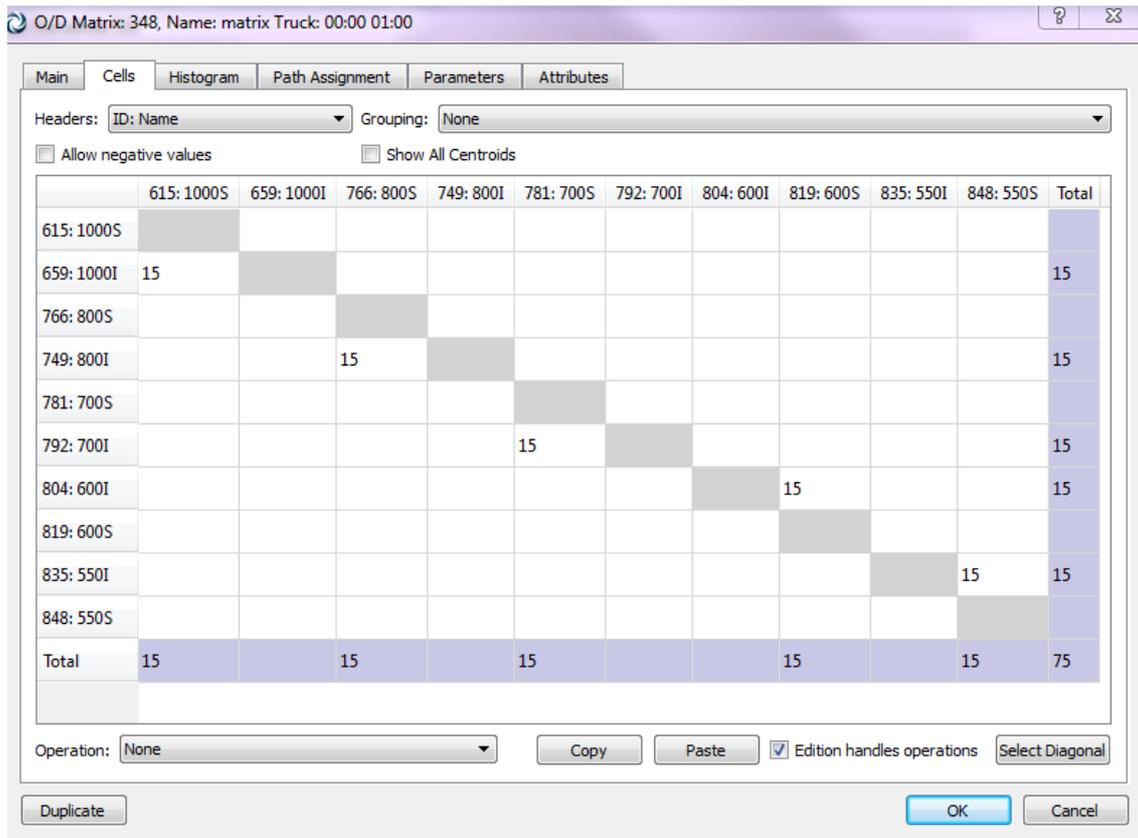


Figura 30: Matriz origen/destino relativa a los vehículos pesados en la aplicación del modelo calibrado dentro del programa informático Aimsun

Estos son los flujos de partida; en esta aplicación se ha decidido cargar los tramos de carretera para un mayor tiempo: en lugar de una hora como en las simulaciones anteriores se ha pensado de simular tres horas, cada una con un flujo de tráfico mayor que el anterior. Para hacer esto, se ha cambiado para cada hora el factor de amplificación de la demanda para cada matriz creada.

Se ha elegido de simular, en orden, el 500%, el 750% y el 1000% del tráfico insertado en la matriz de origen/destino.

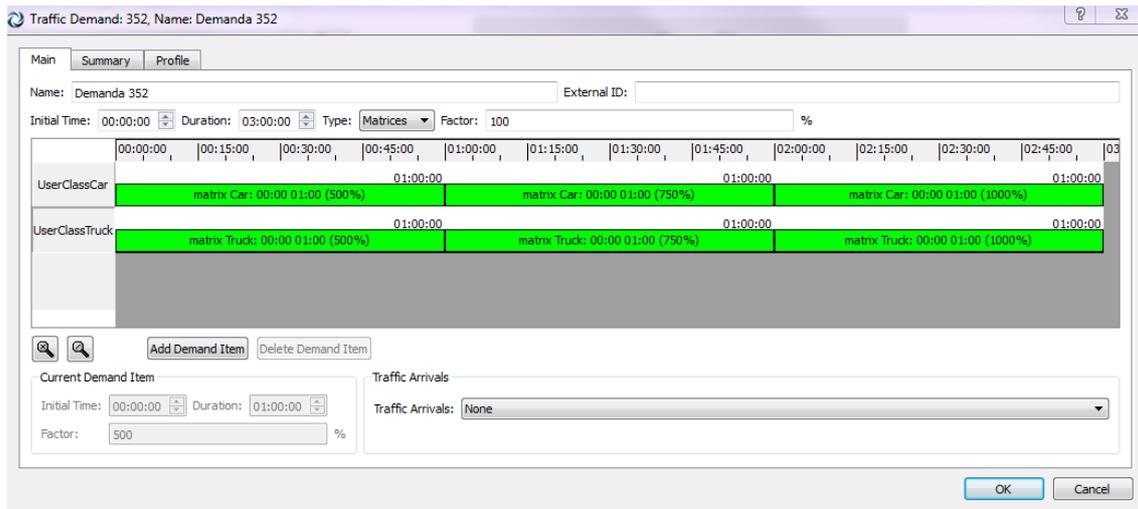


Figura 31: Demanda de tráfico total en la aplicación del modelo calibrado dentro del programa informático Aimsun

También en este caso, como para el escenario de calibración simulado previamente, se ha decidido realizar 15 replicaciones de las que derivan los datos resultantes relativos a los adelantamientos. En la siguiente tabla se puede ver un ejemplo de las tablas generadas dentro del programa para una sección para una replicación, que contiene el número de vehículos en la carretera y los datos de adelantamiento por cada 15 minutos de simulación.

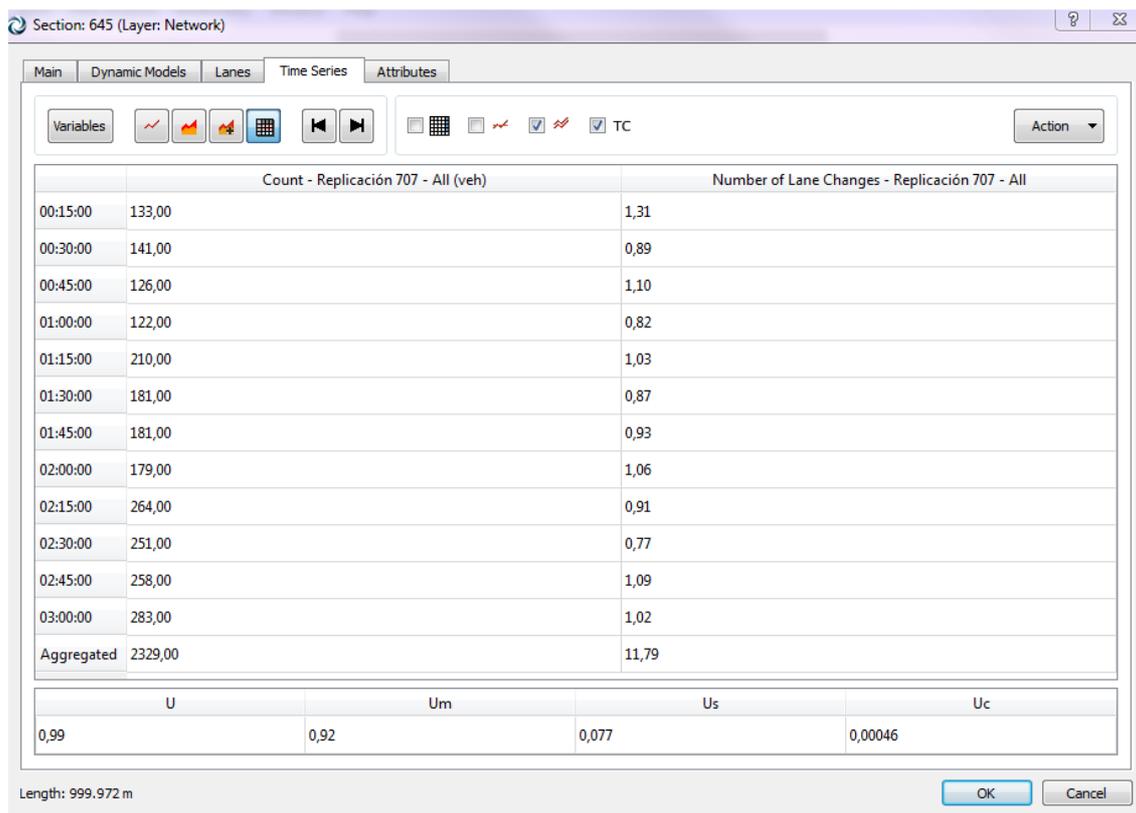


Figura 32: Valores resultantes para el flujo de tráfico y para los adelantamientos obtenidos en una replicación de la aplicación dentro del programa informático Aimsun

Todas las tablas generadas en el programa informático Aimsun fueron importadas dentro del programa Excel y procesadas, como puede verse a continuación. Se han calculado, esta vez, el volumen de tráfico y el número de adelantamientos simulado cada hora y los porcentajes de adelantamiento relacionados con el volumen de tráfico.

Replicación 707						
L=1000						
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.	Aforo tot c. h.	Adel. tot c. h.	% Adel. tot c. h.
00:15:00	133	1,31	88			
00:30:00	141	0,89	63			
00:45:00	126	1,1	70			
01:00:00	122	0,82	51	522	272	52%
01:15:00	210	1,03	109			
01:30:00	181	0,87	79			
01:45:00	181	0,93	85			
02:00:00	179	1,06	95	751	368	49%
02:15:00	264	0,91	121			

02:30:00	251	0,77	97			
02:45:00	258	1,09	141			
03:00:00	283	1,02	145	1056	504	48%
Agregado	2329	11,79				
					Tot Adel.	% Tot Adel.
					1144	49%
L=800						
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.	Aforo tot c. h.	Adel. tot c. h.	% Adel. tot c. h.
00:15:00	126	0,87	55			
00:30:00	117	0,72	43			
00:45:00	136	0,75	51			
01:00:00	130	0,58	38	509	187	37%
01:15:00	176	0,7	62			
01:30:00	167	0,71	60			
01:45:00	190	0,69	66			
02:00:00	173	0,72	63	706	251	36%
02:15:00	282	0,62	88			
02:30:00	252	0,63	80			
02:45:00	243	0,64	78			
03:00:00	257	0,58	75	1034	321	31%
Agregado	2249	8,23				
					Tot Adel.	% Tot Adel.
					759	34%
L=700						
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.	Aforo tot c. h.	Adel. tot c. h.	% Adel. tot c. h.
00:15:00	126	0,68	43			
00:30:00	115	0,73	42			
00:45:00	124	0,56	35			
01:00:00	124	0,53	33	489	153	31%
01:15:00	202	0,65	66			
01:30:00	183	0,44	41			
01:45:00	171	0,7	60			
02:00:00	221	0,58	65	777	232	30%
02:15:00	239	0,6	72			
02:30:00	235	0,56	66			
02:45:00	239	0,43	52			
03:00:00	248	0,52	65	961	255	27%
Agregado	2227	7,00				
					Tot Adel.	% Tot Adel.
					640	29%
L=600						

	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.	Aforo tot c. h.	Adel. tot c. h.	% Adel. tot c. h.
00:15:00	151	0,26	20			
00:30:00	142	0,45	32			
00:45:00	138	0,52	36			
01:00:00	110	0,45	25	541	113	21%
01:15:00	175	0,41	36			
01:30:00	161	0,46	38			
01:45:00	184	0,5	46			
02:00:00	183	0,44	41	703	161	23%
02:15:00	235	0,33	39			
02:30:00	213	0,43	46			
02:45:00	270	0,41	56			
03:00:00	249	0,44	55	967	196	20%
Agregado	2211	5,12				
					Tot Adel.	% Tot Adel.
					470	21%
L=550						
	Aforo (veh)	Número Cambios Carril	Adelant.	Aforo tot c. h.	Adel. tot c. h.	% Adel. tot c. h.
00:15:00	122	0,28	18			
00:30:00	133	0,23	16			
00:45:00	124	0,39	25			
01:00:00	133	0,36	24	512	83	16%
01:15:00	187	0,36	34			
01:30:00	176	0,39	35			
01:45:00	161	0,34	28			
02:00:00	186	0,31	29	710	126	18%
02:15:00	236	0,23	28			
02:30:00	236	0,32	38			
02:45:00	262	0,27	36			
03:00:00	248	0,3	38	982	140	14%
Agregado	2204	3,77				
					Tot Adel.	% Tot Adel.
					349	16%

Tabla 9 Resultados de la aplicación del modelo calibrado y su procesamiento para una replicación

De todo esto datos se han extraído los valores medios para cada longitud del carril de adelantamiento por cada hora simulada dentro de la aplicación, como se muestra en la siguiente matriz.

	1000	800	700	600	550
1	50%	39%	32%	23%	17%
2	53%	37%	29%	22%	17%
3	48%	33%	26%	19%	15%

Tabla 10: Matriz de los valores medios de adelantamientos hechos dentro de la aplicación del modelo calibrado para cada hora simulada, dentro del programa informático Aimsun

El siguiente gráfico representa estos valores.

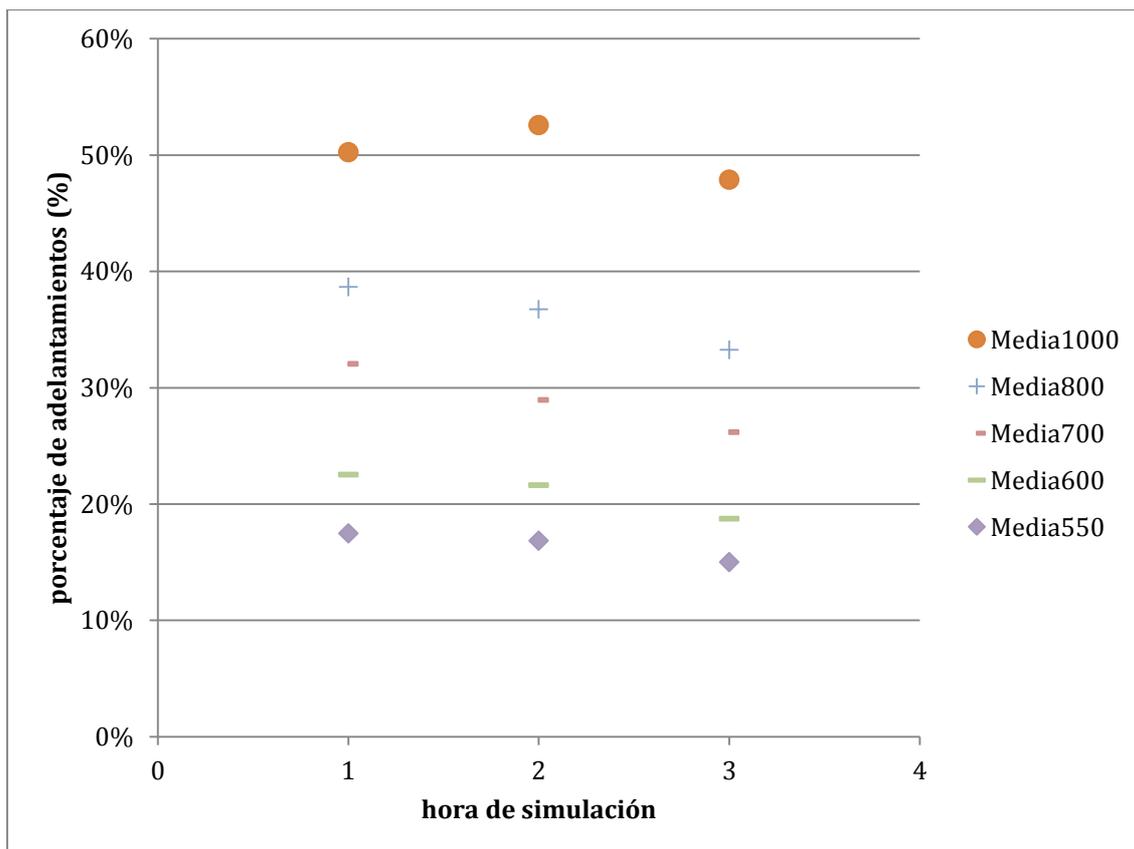


Figura 33: Gráfico relativo a los valores medios de los porcentajes de vehículos que adelantan en las replicaciones de la aplicación del modelo calibrado

Como se puede observar tanto desde la tabla o de la representación gráfica de los datos medios, casi no se pueden apreciar cambios en el porcentaje de los adelantamientos que se producen en los diferentes tramos de carretera para cada longitud. Para cada sección se producen gradualmente más adelantamientos, pero de tal manera que el porcentaje permanece casi constante en el tiempo.

Se ha querido luego estudiar la influencia de la intensidad del flujo de tráfico en los tiempos de retraso del modelo para cada sección representada.

A esto se ha extraído desde el programa Aimsun un gráfico de la demora respecto al flujo considerado. El retraso es considerado como la división entre la resta del tiempo necesario para recorrer el tramo de carretera considerado y del tiempo total que un vehículo tomaría dentro del modelo caminando por la carretera a la velocidad deseada y el tiempo necesario para recorrer el tramo de carretera considerado.

$$\frac{\text{Demora}}{\text{Tiempo de viaje}} = \frac{\text{Tiempo de viaje} - \text{Tiempo de viaje a la velocidad deseada}}{\text{Tiempo de viaje}}$$

En el gráfico se ha considerado el promedio de todas las 15 repeticiones hechas y se pueden ver cinco polilíneas, una para cada tramo representado en el modelo.

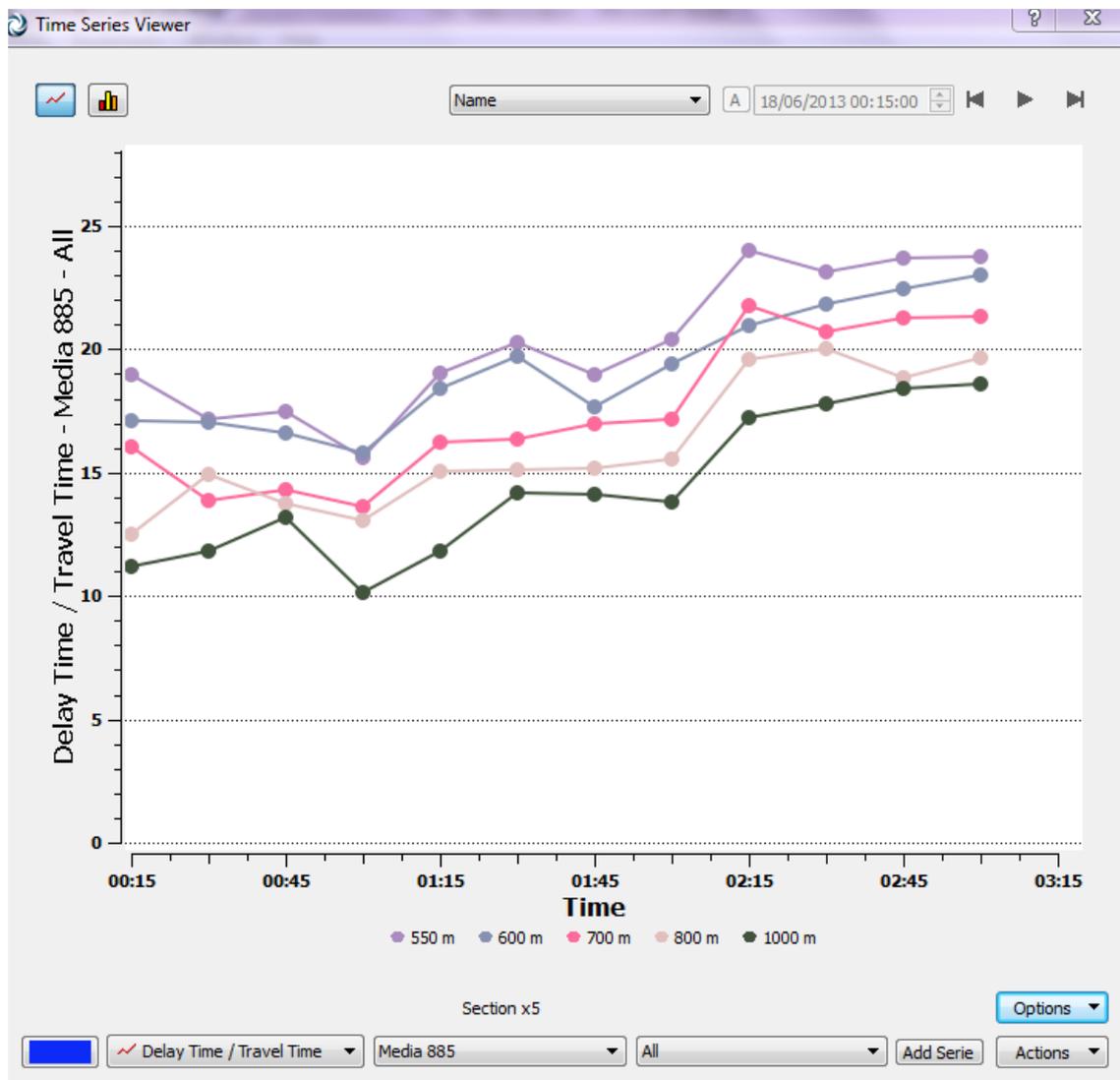


Figura 34: Gráfico relativo a los valores medios de la demora de los vehículos en las repeticiones de la aplicación del modelo calibrado

Como se puede ver fácilmente el flujo esta vez afecta al rendimiento de la carretera, aumentando el tiempo de demora en mayor grado al ser más corto el carril de adelantamiento.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

En este capítulo, se quieren exponer las diversas conclusiones que se pueden extraer de las diversas etapas de este Trabajo de Fin de Máster. Tanto en la parte de implementación del modelo y de su calibración como en la del análisis de los datos resultantes y de la aplicación del modelo calibrado, se han podido recoger muchos datos que han permitido sacar varias conclusiones diferentes para tener una idea más clara del fenómeno estudiado.

Ya antes de empezar el trabajo de investigación experimental en sí, fue posible entender la importancia cada vez mayor en el mundo de este nuevo tipo de carreteras, la 2+1. La gran cantidad de estudios sobre este tema y los campos al que pertenece dejaron claro cuáles son las expectativas de los investigadores sobre los puntos fuertes intrínsecos de esta tipología de carreteras.

En primer lugar la importancia dada al aumento de la seguridad que resulta del uso de estas vías, por segundo al mejoramiento de las características funcionales en comparación con las carreteras convencionales, con un carril en cada dirección, con costes mucho más reducidos en comparación con la realización de carreteras con dos carriles en cada dirección del circulación.

El análisis del estado del arte, sin embargo, también ha llevado a la elección de los programas de microsimulación como mejor herramienta para un estudio adecuado e innovador de esos caminos, identificando, entre otras cosas, en la maniobra de adelantamiento el sello distintivo sobre que centrarse para comprender plenamente el funcionamiento y la funcionalidad de este tipo de vías.

En cuanto al desarrollo del modelo de carreteras 2+1 dentro del programa de microsimulación Aimsun, lo importante a destacar es el método con el cual se ha llegado a la realización de la geometría básica de la carretera y el estudio de las variables importantes para la cambio en el comportamiento de los conductores para adelantar sólo en la sección elegida para representar el tramo de carretera 2+1.

En la creación de los escenarios de calibración, sin embargo, se ha observado cuales son las variables dentro del programa que más influyen en la funcionalidad de las carreteras y, en consecuencia, en los resultados del modelo.

Para obtener un comportamiento fiel de los conductores en el tipo de vía implementada y para lograr resultados lo más plausibles y cercanos posibles a los valores de los datos reales, los parámetros más importantes que se han considerado fueron:

- la distancia de visibilidad, es decir, la distancia hasta el extremo de una sección, donde el modelo de aceptación de huecos comenzará a ser aplicado, para inducir a los conductores a regresar en el carril de la derecha antes del final de la sección intermedia donde es permitido adelantar,
- el margen de seguridad para la maniobra de adelantamiento,
- la longitud del carril de adelantamientos.

Variando las dos primeras, de hecho, se obtiene un comportamiento diferente de la carretera, que ya no estará contenida de esta manera dentro del tipo 2+1. Al variar la longitud, sin embargo, se obtendrán mayores porcentajes de adelantamientos con flujo de tráfico igual en cada tramo representado.

Gracias a la aplicación realizada, por otra parte, se ha podido aprender que la cantidad de tráfico no afecta al porcentaje de adelantamientos, por iguales flujos para cada tramo, de hecho, como ya se dijo, se obtienen siempre los mismos porcentajes de adelantamiento. Se ha observado, sin embargo, cómo el flujo afecta al rendimiento de la carretera, aumentando el tiempo de demora en mayor grado al ser más corto el carril de adelantamiento.

Esto ha podido ser verificado hasta un cierto porcentaje de del tráfico fijado, igual a una intensidad horaria de 1000 vehículos, con un 15% de vehículos pesados, ya que después de este valor, el programa ha resultado no ser capaz de realizar las simulaciones.

Otra limitación del modelo desarrollado en este Trabajo de Fin de Máster es el relacionado con las velocidades detectadas en la entrada y en la salida de la carretera. No se han considerado con suficiente precisión y puede resultar necesario un ajuste de estos parámetros que probablemente afectan a la operatividad de la carretera.

CAPÍTULO VII: FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El estudio llevado a cabo en este Trabajo de Fin de Máster se configura como el primer paso en la creación de un modelo de microsimulación para el análisis de la funcionalidad y las características operativas de las carreteras 2+1 con la ayuda del programa informático Aimsun.

Aunque los resultados alcanzados son indicativos de las características funcionales de la carretera como por ejemplo la identificación de algunas de las variables fundamentales dentro de la herramienta informática o de los parámetros más relevantes para el estudio, hay todavía muchas perspectivas para futuras investigaciones en este campo.

En este breve capítulo queremos enumerar algunas de las principales líneas de investigación futura, con posterioridad a este estudio.

Los estudios resultantes directamente de este trabajo están, sin duda, relacionados con la investigación de otras variables influyentes en el modelo y con la mejora del estudio del efecto de los parámetros ya identificados. Con referencia a los datos en los que se basa la calibración de este estudio, se pueden analizar con más detalle los adelantamientos, identificando las áreas en las que se producen principalmente en el carril de adelantamiento o sus duraciones. Otra variable que se puede intentar introducir está relacionada con el porcentaje de vehículos en cola al ingreso en la sección 2 + 1 y su reducción en la salida. Otros factores de los que se puede recomendar la profundización son, seguramente, todos los relacionados con las velocidades, así como los relativos al porcentaje de vehículos pesados dentro del flujo vehicular.

Otro estudio que se debería hacer sería la creación de un modelo de simulación para toda una carretera 2+1, y no sólo por su sección, compuesta por secciones alternadas tales como las descritas en este trabajo.

Por último, se menciona el estudio posible, llevado a cabo siempre a través de programas de microsimulación, sobre la comparación de los resultados operativos de las carreteras convencionales y de las carreteras de 2+1 en igualdad de condiciones y parámetros.

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, 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, 118-199.
- Bergh, T., Carlsson, A., & Larsson, M. (2003). Swedish vision zero experience. *International Journal of Crashworthiness*, 8(2), 159-167.
- Brewer, M. A., & Wooldridge, M. D. (2003). Signing for passing lane sections on two-lane rural roadways in Texas. *TRB 82nd Annual Meeting*, (1928).
- 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), 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. [Experiencia sueca y francesa en las carreteras 2+1: Vías tan seguras como las autopistas] *Carreteras*, 4(153), 26-37.
- Harwood, D. W., St. John, A. D., & Warren, D. L. (1985). Operational and safety effectiveness of passing lanes on two-lane highways. *Transportation Research Record*, , 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*, 428, 416-425. doi:10.1016/j.physa.2015.01.086.

Irzik, I. M. (2010). Layout of 2+1 routes in Germany-new findings. 4th International Symposium on Highway Geometric Design.

Kaistinen, J., Nieminen, T., & Summala, H. (2004). Driving behavior on split 2+1 lane road. *Advances in Transportation Studies*, (2), 69.

Lee, S., K., Kim, Y., R., Moon, J., P., Choi, J., S., Operational Analysis of 2+1 Roadway and its Use in Developing Geometric Design Standards in S Korea, 4th International Symposium on Highway Geometric Design June 2010 Valencia, Spain, http://www.4ishgd.valencia.upv.es/index_archivos/cr7.pdf.

Llorca, C., et al. Development of a new microscopic passing maneuver model for two-lane rural roads. *Transportation Research Part C* 52 (2015) 157–172.

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. *Proceedings of the Second International Conference on Traffic and Transport Engineering (Ictte)*, , 401-409.

Weber, R., Irzik, M., & Baselau, C. (2008). 2+1 roads - new findings from Germany. *Traffic Engineering and Control*, 49(4), 145-151.