

Primera aproximación al modelado y control de tráfico

Ortiz, Miguel^a, Santos, Matilde^b, Romana, Manuel^c

^a Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

^b Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática, Facultad de Informática, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.

^c Departamento de Ingeniería del Transporte, Territorio y Urbanismo, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

To cite this article: Ortiz, M., Santos, M., Romana, M. 2023. Primera aproximación al modelado y control de tráfico. XLIV Jornadas de Automática, 441-446 <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.441>

Resumen

España posee 17.021 km de vías de alta capacidad, autovías y autopistas, y en torno al 95% del transporte por mercancías se realiza por carretera, gran parte por este tipo de vías. Estos vehículos pesados son a menudo más lentos y menos dinámicos que los turismos, y su presencia puede modificar el discurrir del flujo del tráfico, sobre todo ante escenarios con intensidades altas y en situaciones en las que dichos vehículos se desplacen lateralmente. Esto puede producir que se resienta el nivel de servicio de la vía. La motivación del presente trabajo es estudiar la formación de colas causadas por interferencias en el tráfico en vías de alta capacidad causadas por un cambio en la sección transversal de la vía y/o por vehículos pesados y lentos, para después poder aplicar acciones de control, mitigación y prevención para evitarlas o minimizarlas. Para ello, se modelará un tramo de autopista con un ramal de incorporación y una reducción del número de carriles y se estudiará comparativamente la efectividad de dos sistemas de control del tráfico.

Palabras clave: Modelado, Carreteras, Cuellos de Botella, Vehículos Pesados, Control, Tráfico.

Abstract

Spain has 17,021 km of high-capacity roads, dual carriageways and highways, and around 95% of freight transport is carried out by road, much of it on this type of road. These heavy goods vehicles are often slower and less dynamic than passenger cars, and their presence can modify the flow of traffic, especially in scenarios with high intensity and in situations in which these vehicles move laterally. This can cause the service level of the road to suffer. The motivation of this work is to study the formation of queues caused by traffic interference on high-capacity roads, caused by a change in the cross section of the road and/or by heavy and slow vehicles, to apply control actions, mitigation, and prevention to avoid or minimize them. To do this, a highway section will be modelled with an incorporation branch and a reduction in the number of lanes and the effectiveness of two traffic control systems will be studied comparatively.

Keywords: Model, Highway, Bottleneck, Heavy Goods Vehicles, Queues, Control.

1. Introducción

Los cuellos de botella se producen en la mayoría de las ocasiones por dos factores: un trazado con incorporaciones, trenzados o reducción en el número de carriles, o por la perturbación del flujo del tráfico por la interacción de unos vehículos con otros, generalmente debido a un vehículo más

lento (Li et al., 2020). Ambos fenómenos no son independientes y existe una clara interrelación entre el primero y el segundo.

El mecanismo bajo el que discurre el flujo del tráfico es bastante simple: al circular con su vehículo, el conductor actúa sobre dos variables para posicionarse en el espacio y tiempo, la dirección (un vector en el plano horizontal, 2D) y la

*Autor para correspondencia: miguorti@ucm.es

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

velocidad de avance, pudiendo actuar sobre ellas siempre que la vía y el tráfico se lo permita. En esas condiciones se puede hablar de *tráfico en flujo libre*. Sin embargo, hay situaciones en las que el conductor debe adaptarse a las condiciones existentes: cuando el conductor quisiese circular a mayor velocidad pero la presencia de otros usuarios o la geometría de la vía se lo impidiese, éste debería adaptar su conducción a la del vehículo anterior, entrado en un modelo de *car-following*, origen de la formación de las colas que generan las retenciones en las autopistas.

De cara a abordar un modelo que permita representar un escenario en el que se puedan evaluar (al menos académicamente) todos esos conceptos, poder desarrollar métodos de control del tráfico que sean efectivos y abordables, y comparar sus resultados, en este trabajo se plantea un modelo para la simulación del flujo de vehículos en una sección de un trazado de autopista en el que se aúnan, por un lado, los efectos de la incorporación de vehículos más lentos con una reducción en el número de carriles de la sección, favoreciendo de esa manera la formación no sólo de un cuello de botella físico y fijo (el de la reducción del número de carriles) sino también la de cuellos de botella móviles causados por los propios vehículos en movimiento, buscando adaptarse a la situación cambiante.

Estos modelos son imprescindibles para el diseño y evaluación de estrategias de control que faciliten el flujo del tráfico y aumenten la seguridad y el confort en la conducción (Romana et al., 2016) (Romana et al., 2022) (Subraveti et al., 2021). Sin embargo, es difícil encontrar herramientas que permitan simularlos y su configuración no es sencilla (Li et al., 2020)). En este artículo se ha aplicado el software de simulación Vissim (Martín Gasulla, 2011), de la empresa PTV, junto con su herramienta de gestión de secuencias VisVAP.

Se ha prestado especial cuidado en el diseño geométrico de la sección de estudio, estableciendo dos configuraciones posibles, y se propone un sistemas de gestión y control del tráfico a modo de ejemplo para valorar su efecto de regulación y validar el modelo.

2. Definición del Modelo

2.1. Geometría de la vía

El modelo se ha planteado como una simplificación de una serie de tramos de autopista que, dada su especial disposición y concurrencia, pueden llegar a “sufrir” una saturación puntual.

Resultado de ello, se ha llegado a un tramo de autopista periurbana (en un entorno llano) de tres carriles de circulación en el que se produce una incorporación y una reducción en el número de carriles y, a la vez, existe una calzada extra que se puede habilitar según el estado del tráfico.

Se ha tomado como referencia la Instrucción de Carreteras, Norma 3-1 IC “Trazado” (Orden FOM/273/2016), en lo referente a la sección transversal y geometría longitudinal de transiciones y cambios de carril. A este respecto, se han considerado dos variantes del modelo: una que cumple con la recomendación de una distancia mínima entre pérdidas de carril no menor a 500 m. y una en la que esa distancia es de 350 m.

El trazado planteado posee la forma que se aprecia en la Figura 1, el cual es el resultado de la concatenación de los siguientes elementos:

- Tronco principal de 3 carriles de 3.5 metros de anchura, de longitud 250 m.
- Carril extra de descargo con activación automática: se ha propuesto un único carril de 3.50 m. de anchura y velocidad limitada a 90 km/h.
- Ramal de incorporación con carril de aceleración terminado en cuña, respetando lo dispuesto en la Norma 8.1-IC. La velocidad de incorporación por el ramal se encuentra recomendada (que no limitada) a 60 km/h debido a la pronunciada curva que forma.
- Sección de confluencia de carriles con distancia, según el caso, de 350 m. ó 500 m.
- Tramo final de 215 m. y unión de los flujos.

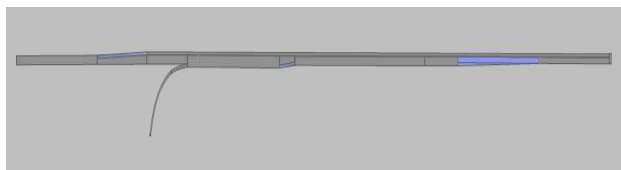


Figura 1: Modelo de estudio en PTV Vissim

Como apunte adicional, el tronco de la autopista se encuentra limitado a 120 km/h para turismos, 90 km/h para vehículos pesados y 70 km/h para pesados de gran tonelaje.

Igualmente, los conectores y transiciones incorporados en el modelo (unión entre distintos links, cambios en la sección, etc.) se han configurado para ser tenidos en cuenta por los conductores con una antelación de 500 m, garantizando un tráfico lo más fluido y pausado posible.

2.2. Entradas del modelo

Para obtener unos resultados representativos y ricos en detalles, se ha buscado la obtención del punto de *breakdown* que marque el nivel de saturación del tronco considerado (Dervisoglu et al., 2009). Con ese fin, se ha modulado la capacidad del tráfico del modelo planteado, tomando como referencia que un estándar de capacidad aceptado es el de 2.000 vehículos ligeros por hora y carril para este tipo de vía.

Para ello, se ha considerado un periodo de simulación de 1 hora dividido en intervalos de 5 minutos con dos distribuciones diferenciadas, como se refleja en la Tabla 1: en la primera, la entrada de vehículos crece hasta llegar a la capacidad máxima o punto de *breakdown* de la sección para, a continuación, disminuir progresivamente y recuperar el nivel de servicio; en la segunda, ese crecimiento es más rápido, sobrepasa el punto de *breakdown* y continúa aumentando mientras se aprecia un fenómeno de *capacity-drop*.

Tabla 1: Detalle de la distribución horaria de vehículos para los dos puntos de trabajo elegidos. Fuente: elaboración propia.

Time (s)	Tráfico sin saturar		Tráfico saturado	
	Tronco (veh/h)	Ramal (veh/h)	Tronco (veh/h)	Ramal (veh/h)
0-300	1500	500	1500	500
300-600	1600	600	1700	600
600-900	1700	500	1900	500
900-1200	1800	600	2100	600
1200-1500	1900	620	2300	620
1500-1800	2000	625	2500	625
1800-2100	2100	630	2600	630
2100-2400	2000	620	2700	620
2400-2700	1900	600	2800	600
2700-3000	1800	550	2900	550
3000-3300	1700	500	3000	500
3300-3600	1600	450	3100	450

Igualmente, de cara a estudiar la influencia de los vehículos pesados en un tráfico en autopista cargado, se ha decidido fijar el porcentaje de pesados en un 31%, considerando que, dentro de ellos, existen dos grupos, uno más rápido que otro (aproximadamente en una relación 2:1) para, en parte, simular el efecto de la orografía del trazado, pues cuan más sinuosa sea, mayor efecto sobre la dinámica de los vehículos pesados tendrá y, por lo tanto, mayor afectación tendrá sobre el conjunto del tráfico.

2.3. Comportamientos de los vehículos

En la sección de *Driving Behaviors* de PTV Vissim, se pueden configurar los parámetros que rigen el comportamiento de los conductores según varios modelos y con varias opciones en cuanto a distancias consideradas, número máximo de vehículos con los que se considera interactuando a la vez, vigilar los carriles adyacentes, avanzarse a la siguiente decisión de ruta, etc...

En el caso del modelo desarrollado, se han considerado dos de los *Driving Behaviors* ofrecidos por el programa por defecto:

- Para la sección aguas arriba de la incorporación y aguas debajo de la segunda reducción de carril, así como para el vial extra, se ha seleccionado el *Right-Side Rule* (motorized), que está calibrado para que los vehículos circulen por el carril de la derecha siempre que sea posible.
- Para la sección que va de la incorporación a la desaparición del tercer carril del tronco se ha seleccionado el *Freeway* (free lane selection), que permite a los conductores situarse en el carril que más les convenga en función del destino y la velocidad prefijada para ellos.

Ambos dos *Driving Behaviors* mencionados se basan en un modelo Wiedeman 99 (Higgs et al., 2011) con unos parámetros de seguimiento en cuanto a distancias y dinámicas iguales. Por el contrario, en lo referente a los cambios de carril e interacción con otros vehículo, sí que existen diferencias. Además, en ambos casos, se han habilitado las opciones de *observe adjacent lane(s)*, *advanced merging* y *consider next turn* para hacer del modelo más real y fluido, asimilando el comportamiento de los vehículos del modelo al real que un conductor tendría.

3. Sistemas de control del tráfico

En el presente trabajo se presentan dos sistemas de control del tráfico de amplio y extendido uso, adaptados a la casuística que se está estudiando, para posteriormente valorar su efecto y usabilidad en el control del tráfico.

En base a ese diseño propuesto, se han considerado dos distribuciones de tráfico a lo largo de un periodo de simulación de una hora para estudiar el efecto de esos sistemas de control y estudiarlos comparativamente.

3.1. Calzada extra

Se trata de un carril de descarga cuya entrada se encuentra aguas arriba de la incorporación modelada y su final se encuentra al final del modelo.

Para su representación, se han generado dos *partial routes* dentro del modelo: ambas dos nacen en la sección inicial del tronco considerado, y mientras que una continua por él hasta llegar al final, la segunda se desvía por el carril adicional. Así pues, sólo hace falta un algoritmo de control que regule cuándo se debe abrir el carril y qué proporción de vehículos se desviarán por el en caso de abrirse.

Para ello, se ha implementado una secuencia en VisVAP que evalúa cada 5 minutos mediante cuatro estaciones de aforo situadas de forma paralela (justo en el punto de enlace entre el tronco de la autopista y el ramal de incorporación) el valor acumulado de vehículos que han pasado en ese periodo. Con ese dato, si supera un valor de Q_{ON} se abrirá durante los siguientes 5 minutos el carril extra; si, por el contrario, 5 minutos después, el valor acumulado cae por debajo de Q_{OFF} , se cerrará el carril extra. La secuencia tendría la siguiente forma:

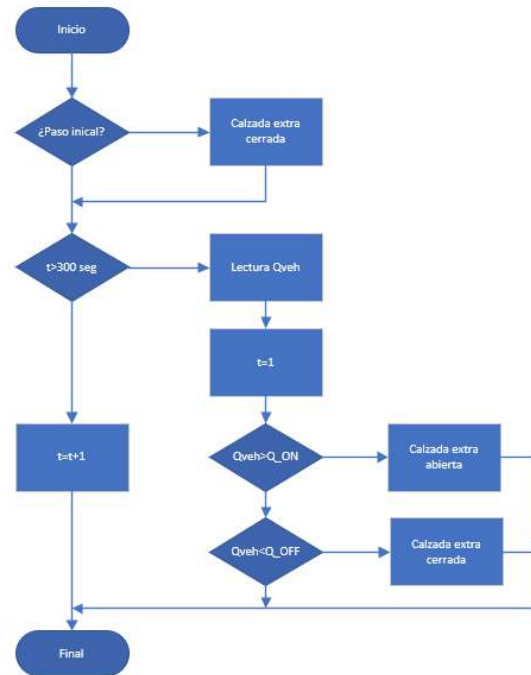


Figura 2: Diagrama de flujo gestión calzada extra.

En cuanto a la proporción de vehículos que pasan al carril adicional, se ha estimado que al tener el tronco inicialmente 3 carriles y ser el carril adicional uno extra, la proporción de vehículos que se desvían es 1:3, si bien el valor es ajustable y podría llegar a plantearse incluso un cálculo que lo modificase en función de las condiciones reales del tráfico en cada momento.

3.2. Sistema de restricción de vehículos pesados lentos

Igualmente, y haciéndonos servir de la herramienta *Attribute Modification* de Vissim, se ha implementado un script que evalúe el flujo de vehículos que pasan por el punto mencionado anteriormente (justo antes de la desaparición del tercer carril del tronco) para, si supera un valor (fijado en este caso en 2500 veh/h), restringir el uso de la vía por parte de los vehículos más lentos, en este caso los de la categoría HGV_low que serían los que se asimilarían a los camiones de gran tonelaje.

Esta medida, que habitualmente se toma en las vías de alta capacidad en operaciones de tráfico debido a grandes previsiones de viajes por carretera, es bastante efectiva pues retira de la circulación vehículos cuya dinámica es sensiblemente peor que la del resto de usuarios de la vía (menor velocidad, menor capacidad de aceleración, mayor distancia de frenado...). Todo esto hace que el flujo del tráfico se vea entorpecido al tener que esquivar estos obstáculos móviles, por no hablar de todas las colas que pueden causar si se cambian de carril por adelantarse entre ellos o si tienen que enfrentarse a un cambio fisionómico de la sección transversal, como es el caso del estrechamiento planteado en el modelo.

4. Análisis de las estrategias de control y comparación de resultados

La validez y efectividad de los métodos modelados se interpretará a partir de las tres gráficas siguientes:

- Gráfica capacidad-densidad, que relaciona el flujo (veh/h) que pasa por un punto del trazado con la densidad (veh/km) que existe en ese momento (Laval, 2006).
- Gráfica velocidad-densidad, que relaciona la velocidad (km/h) de los vehículos en esa sección con la densidad de ésta.
- Gráfica velocidad-capacidad, o de Van Aerde (Asgharzadeh et al., 2018).

Estudiar las condiciones de la capacidad pasa por la interpretación de sus pendientes y la identificación de los puntos en los que cambia de signo: este mecanismo correspondería con los conceptos de *capacity-gain*, *breakdown* y *capacity-drop* (Lorenz et al., 2011).

El punto elegido para la toma de datos es el ya mencionado: el anterior a la pérdida del tercer carril del tronco principal.

El escenario original, sin regulación alguna, se aprecia cómo con el tráfico no saturado de la Tabla 1, la sección que no cumple la IC y presenta una longitud menor entre pérdidas de carril alcanza el punto de *breakdown* en el entorno de los 3000 veh/h, presentando un aumento claro de densidad

circulatoria y una caída en la velocidad media del conjunto superior a 20 km/h respecto a la inicial. Por el contrario, la sección que sí respeta la recomendación no alcanza ese punto de congestión. Esto se puede apreciar en las Figuras 3 y 4.

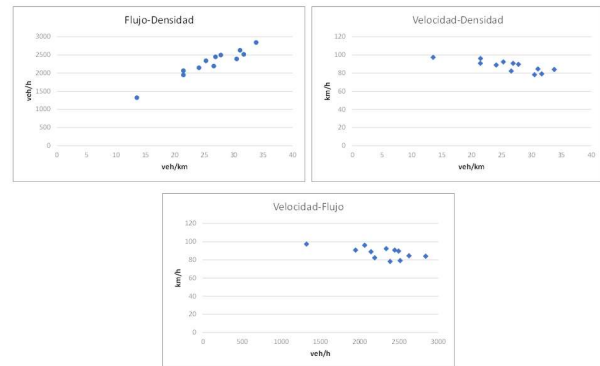


Figura 3. Estado del tráfico ante la distribución de tráfico no saturado para distancia de 500 m y sin ningún sistema de control del tráfico.

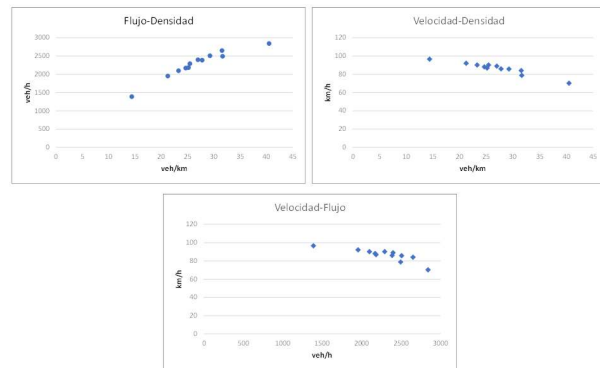


Figura 4: Estado del tráfico ante la distribución de tráfico no saturado para distancia de 350 m y sin ningún sistema de control del tráfico.

Para el caso de la segunda distribución considerada, la de tráfico saturado (Figuras 5 y 6), se aprecia cómo se produce el *capacity-drop* con ambas distancias consideradas. En el caso de cumplir la IC, se puede determinar que la vía deja de ganar capacidad en torno con una intensidad de 3500 veh/h.

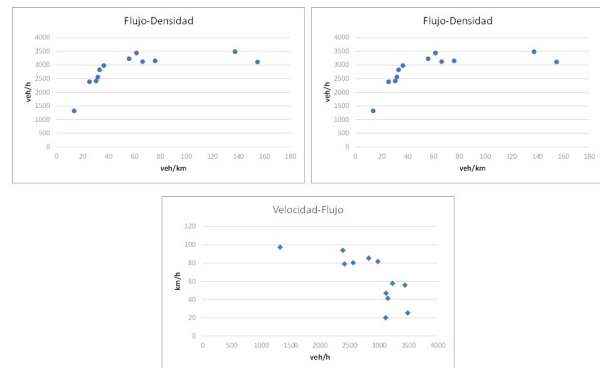


Figura 5: Estado del tráfico ante la distribución de tráfico saturado para distancia de 500 m y sin ningún sistema de control del tráfico

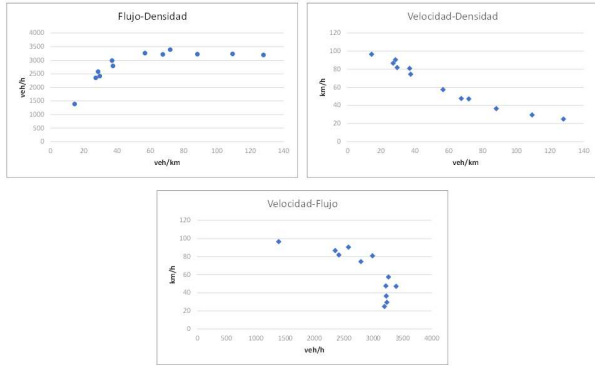


Figura 6: Estado del tráfico ante la distribución de tráfico saturado para distancia de 350 m y sin ningún sistema de control del tráfico

4.1. Calzada extra

El carril extra gestionado es una buena alternativa pues, presumiblemente dará a la vía más capacidad al incluir un carril más que sumar a la sección original. Si se comparan los datos de la vía con tráfico saturado (Figura 7), se aprecia que el carril extra absorbe en el peor de los momentos 872 veh/h, lo que implica que, en ese periodo de 5 minutos, hay un gran descargo en el tronco principal. En términos absolutos, la vía gana 474 veh/h de capacidad (2979 veh/h del escenario base versus 3453 veh/h de capacidad con la adición del carril extra gestionado).

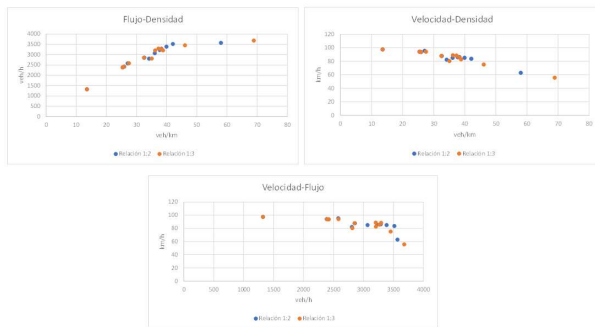


Figura 7: Comparativa entre proporciones de descargo por parte del carril extra gestionado en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril.

Con el automatismo de apertura de la calzada extra, tan sólo se aprecian dos intervalos de 5 minutos en los que el tráfico supera el punto de *breakdown*, mientras que sin ningún sistema gestionado la vía pasa hasta 6 intervalos saturada, la mitad del tiempo, lo que desemboca en que la congestión se va extendiendo por el tronco llegando a afectar incluso al ramal de incorporación. Por el contrario, en situaciones de tráfico no saturado, el sistema enunciado pierde gran parte de su efecto, pues cuanto menos vehículos ingresen en el tramo de estudio, menos pasarán a circular por la calzada extra.

Igualmente se puede evaluar qué relación de vehículos a derivar por la calzada extra es más efectivo de cada a la capacidad agregada de ambas secciones. En ese aspecto, el efecto de pasar una relación 1:3 a 1:2 en la capacidad de descargo implica una ligera mejora en la capacidad conjunta de la vía, pasando de 3453 veh/h a 3515 veh/h.

4.2. Sistema de restricción de vehículos pesados lentos

Retirando los vehículos pesados más lentos ante intensidades superiores a 2500 veh/h se puede conseguir mejoras en la fluidez, una mayor velocidad media y una menor densidad circulatoria.

En el caso de un tráfico no saturado, se observa que el sistema sólo actuaría entre el minuto 30 y el 50, sin embargo, viendo que el perfil muestra velocidades más altas y que la densidad circulatoria mayor es menor que sin la regulación, se aprecia que hay un efecto positivo (ver Figura 8). Con tráfico saturado, las curvas se van separando de las originales desde un instante temprano y, si bien el flujo llega a congestionarse, lo hace un menor medida (ver Figura 9).

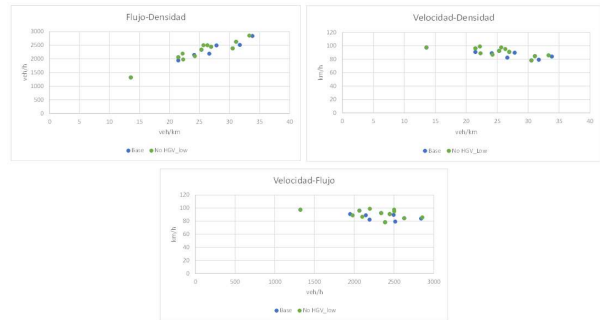


Figura 8: Efecto de la restricción de pesados lentos ante tráfico no saturado en el tronco con L=500 m entre pérdidas de carril.

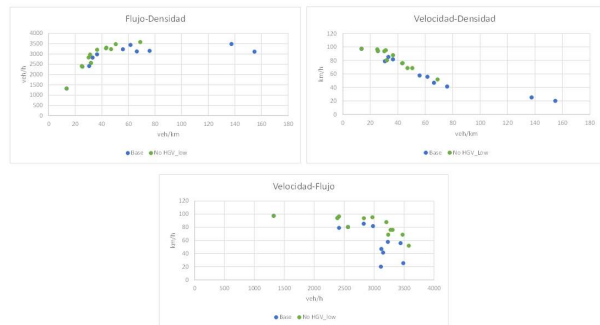


Figura 9: Efecto de la restricción de pesados lentos ante tráfico saturado (derecha) en el tronco con L=500 m entre pérdidas de carril.

Igualmente, se ha evaluado el efecto de añadir a la prohibición original otra al resto de vehículos pesados y furgones a partir de 3000 veh/h, que es un valor muy cercano al *breakdown* con el mix inicial. Los resultados, como se pueden ver en la Figura 10, son muy satisfactorios.

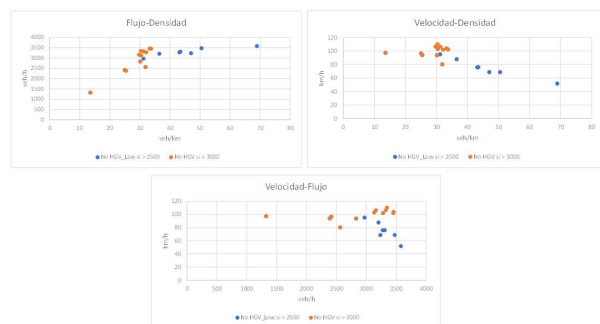


Figura 10: Efecto de la restricción de todos los vehículos pesados ante saturado en el tronco con L=500 m. entre pérdidas de carril.

5. Conclusiones y trabajos futuros

Las estrategias de control de tráfico expuestas han demostrado, ante todo, tener efectividad en un escenario concreto.

Para situaciones en las que el tráfico presente los primeros signos de congestión, el carril extra gestionado y las restricciones a vehículos pesados son métodos efectivos. Sin embargo, ambos dos sistemas implican una infraestructura extra (una calzada adicional en un caso, aparcamientos y sistemas de detección e información por el otro).

Para estadios del tráfico que no alcancen el punto de *breakdown*, los sistemas aquí desarrollados presentan unas mejoras en las variables controladas más limitadas teniendo en cuenta esa infraestructura extra necesaria, por lo que otros sistemas de gestión del tráfico menos intrusivos podrían obtener resultados más eficientes en esos escenarios.

Cualquier estrategia de control agregada que se desarrolle deberá tener en cuenta estos aspectos, identificando en cada situación cuál es escenario de trabajo y utilizando en consecuencia estos sistemas de una forma ordenada y eficiente.

Como trabajos futuros se propone la implementación de otras estrategias de control, como el *ramp metering*, la gestión de carriles o gestión de configuración en *platoon* (Echeto et al., 2022).

Referencias

- [1] Li, Z. C., Huang, H. J., & Yang, H. (2020). Fifty years of the bottleneck model: A bibliometric review and future research directions. *Transportation research part B: methodological*, 139, 311-342.
- [2] Martín, S., Romana, M. G., & Santos, M. (2016). Fuzzy model of vehicle delay to determine the level of service of two-lane roads. *Expert Systems with Applications*, 54, 48-60.
- [3] Barreno, F., Romana, M. G., & Santos, M. (2022). Fuzzy expert system for road type identification and risk assessment of conventional two-lane roads. *Expert Systems*, 39(9), e12837.
- [4] Subraveti, H. H. S. N., Srivastava, A., Ahn, S., Knoop, V. L., & van Arem, B. (2021). On lane assignment of connected automated vehicles: strategies to improve traffic flow at diverge and weave bottlenecks. *Transportation research part C: emerging technologies*, 127, 103126.
- [5] Li, C., Yue, W., Mao, G., & Xu, Z. (2020). Congestion propagation based bottleneck identification in urban road networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(5), 4827-4841.
- [6] Martín Gasulla, M. (2011). Estudio y mejora de la capacidad y funcionalidad de glorietas con flujos de tráfico descompensados mediante microsimulación de tráfico. Aplicación a la intersección de la CV-500 con la CV-401. El Saler(TM Valencia). Licenciatura. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.
- [7] Dervisoglu, G., Gomes, G., Kwon, J., Horowitz, R., & Varaiya, P. (2009, January). Automatic calibration of the fundamental diagram and empirical observations on capacity. In *Transportation Research Board 88th Annual Meeting (Vol. 15, pp. 31-59)*.
- [8] Higgs, B., Abbas, M., & Medina, A. (2011, September). Analysis of the Wiedemann car following model over different speeds using naturalistic data. In *Procedia of RSS Conference (pp. 1-22)*.
- [9] Laval, J. A. (2006). Stochastic processes of moving bottlenecks: Approximate formulas for highway capacity. *Transportation Research Record*, 1988(1), 86-91.
- [10] Asgharzadeh, M., & Kondyli, A. (2018). Comparison of highway capacity estimation methods. *Transportation research record*, 2672(15), 75-84.
- [11] Lorenz, M. R., & Elefteriadou, L. (2001). Defining freeway capacity as function of breakdown probability. *Transportation Research Record*, 1776(1), 43-51.
- [12] Echeto, J., Santos, M., & Romana, M. G. (2022). Automated vehicles in swarm configuration: Simulation and analysis. *Neurocomputing*, 501, 679-693.