Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

GESTIÓN DEL TRÁFICO ANTE INCIDENCIAS EN LOS ACCESOS DE SANTANDER

TRABAJO FINAL DE MASTER

Trabajo realizado por:
Pablo Manzano Moratinos

Dirigido:
Borja Alonso Oreña
José Luis Moura

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

Santander, Septiembre de 2016

ÍNDICE

ÍNDICE 3

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO 7

Introducción 7

Situación general 7

Incidencias 8

Objetivos y composición del estudio 11

Objetivos 11

Composición 11

2 GESTIÓN DE TRÁFICO. REENRUTAMIENTO. 13

Gestión activa de tráfico 13

Reenrutamiento o Dynamic Rerouting 16

Diseño de un sistema de reenrutamiento 17

Sistemas de reenrutamiento actuales 19

Alemania 19

Estados Unidos 21

3 SISTEMA DE DETECCIÓN DE INCIDENCIAS 28

Detección de Incidencias 28

Afección de las incidencias al tráfico 28

Tipos de Algoritmos de Detección de Incidencias 29

Algoritmos comparativos 29

Algoritmos estadísticos 30

Algoritmos de series temporales 30

Algoritmos de filtrado o smoothing 30

Algoritmos de modelado de tráfico 30

Algoritmos de inteligencia artificial 31

Algoritmos de procesamiento de imágenes 31
Calibración e índices de desempeño 31
Algoritmo California 32
Algoritmo empleado en el estudio 35
4 MICROSIMULACIÓN. BASES Y APLICACIÓN EN TIEMPO REAL 36
Simulación de tráfico. Tipos. 36
Microsimulación 37
Car Following 38
Lane Changing 40
Microsimulación en tiempo real para HTMS 43
5 SISTEMA DE GESTIÓN PROPUESTO Y METODOLOGÍA GENERAL. 47
Sistema de gestión de incidencias propuesto 47
Metodología general 49
6 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: CONSTRUCCIÓN DE LA RED Y MODELIZACIÓN DE LA DEMANDA. 51
La oferta de transporte. Red modelizada. 51
La demanda de transporte. Calibración macroscópica. 54
La calibración microscópica 58
7 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: INCIDENCIAS SIMULADAS 61
Incidencias del modelo 61
Incidencia PCTCAN 61
Incidencia Corte Inglés 63
8 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: PROCESO DE DISEÑO DE LAS ESTRATEGIAS DE REENRUTAMIENTO 65
Proceso general 65
Algoritmo de detección 66
Escenario sin incidencias 67

9 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: DISEÑO DE LA ESTRATEGIA PCTCAN.... 68

Detección.... 68

Escenario *Do Nothing* 70

Búsqueda de la estrategia óptima 72

Estrategia escogida 75

Descripción.... 75

Comparación Nivel de Servicio.... 77

Diagramas espacio-tiempo 80

10 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: DISEÑO DE LA ESTRATEGIA CORTE INGLÉS 82

Detección.... 82

Escenario *Do Nothing* 84

Búsqueda de la estrategia óptima 86

Estrategia escogida 90

Descripción.... 90

Comparación Nivel de Servicio.... 92

Diagramas espacio-tiempo 95

11 APLICACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS. INFORMACIÓN AL USUARIO... 97

Criterios de diseño de los PMV.... 98

Criterio 1: Aspectos previos a la utilización de los PMV.... 98

Criterio 2: Uso de los pictogramas en PMV.... 102

Criterio 3: Uso de los elementos alfanuméricos en PMV 106

Criterio 4: Estrategias de localización de los eventos viales 108

Criterio 5: Utilización de mensajes preceptivos. 112

Diseño de mensajes y colocación de los paneles.... 113

Estrategia PCTCAN 113

Estrategia Corte Inglés 114

12 CONCLUSIONES 120

13 Bibliografía..... 122

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Introducción

Situación general

En las últimas décadas, los sistemas de vigilancia y gestión del tráfico se han desarrollado intensamente, apoyados en la investigación y en el desarrollo de las tecnologías de la información, lo que ha dado lugar a nuevas formas de mejorar la funcionalidad de una red de transporte. Esto, combinado con la crisis económica de 2008, que supuso una paralización del gasto público en numerosos países y el fracaso de las políticas de impulso de la demanda interna (que dieron lugar entre otras cosas a las "autopistas vacías"), ha hecho que las administraciones sean más proclives a buscar alternativas que eviten la construcción de nuevo viario para resolver sus problemas de demanda de tráfico. Por esta razón, cada vez son más las administraciones que recurren a Sistemas Avanzados de Gestión del Tráfico (ATMS) para mejorar el uso de la red de transporte.

Los Sistemas Avanzados de Gestión del Tráfico (ATMS) buscan reducir, o al menos contener, la congestión del tráfico en entornos urbanos valiéndose de la mejora de la eficiencia de utilización de las infraestructuras existentes. Estos sistemas habitualmente se emplean para buscar soluciones a los problemas de congestión que aparecen en las autovías urbanas y las calles a través del despliegue de tecnologías de detección del estado del tráfico, telecomunicaciones y procesadores de datos, así como de instalaciones de tráfico como son la semaforización o los VMS.

El objetivo de estos sistemas es vigilar el funcionamiento de la red en tiempo real mediante la recopilación de datos, para realizar cambios en el funcionamiento de la red (límites de velocidad, apertura y cierre de carriles, regulación semafórica…) para mejorar el comportamiento de la red ante la nueva situación, durante el tiempo que sea necesario a fin de maximizar unos indicadores de eficiencia dinámica. Estos indicadores dependen de los objetivos que se persiguen, que por lo general incluyen:

Impacto ambiental: En las grandes áreas urbanas los efectos ambientales del tráfico se consideran críticos, llevando repetidamente a alcanzar concentraciones de contaminación muy por encima de los límites aceptables. El tráfico rodado es la principal fuente de contaminación y uno de los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero, incrementando la concentración de dióxido de nitrógeno y de partículas en suspensión PM10. Esta contaminación es directamente proporcional al consumo de combustible, y en congestión el consumo de combustible y la congestión se incrementan notablemente. Por ello, la mejor forma

de atajar este problema en las áreas urbanas es reducir el consumo de combustible por viajero y minimizar la congestión de la red.

Eficiencia operativa: La sociedad necesita obtener el máximo provecho de las inversiones en infraestructura. Existen estudios (Geroliminis y Daganzo (2007, 2008)) en los que se demuestra que el funcionamiento de una red con una demanda alta es mucho más ineficiente con gestión espontánea (ausencia de Traffic Management) que con herramientas de Traffic Management, debido a los efectos de Gridlock y Capacity Drop. En esta idea es en la que se basan los sistemas de aumento de oferta mediante gestión del tráfico.

Nivel de seguridad: Cualquier uso de una infraestructura viaria debe presentar un nivel de seguridad aceptable, y cualquier sistema de gestión de tráfico tiene como objetivo mantener o mejorar dichos niveles de seguridad. .

Fiabilidad de red: Los tiempos de viaje predecibles y estimaciones de tiempo de llegada precisas son apreciados por los usuarios de la carretera. La capacidad de resolver contigencias y la percepción de buen funcionamiento de la red predispone a la opinión pública en favor de estos sistemas de gestión, lo cual es de vital importancia, ya que el buen funcionamiento de la red se basa en el equilibrio de los intereses individuales de todos los usuarios, y en ocasiones dichos usuarios no son favorables a algunas medidas como la limitación de velocidad (Sistemas de velocidad variable) o la semaforización adicional (Ramp Metering) que pueden beneficiarles.

El ATMS considera dos problemáticas diferentes: la de la congestión causada por los patrones de tráfico regulares (Sistemas de Gestión de la Congestión o CMS) y los problemas de tráfico causados por incidencias no predecibles (Sistemas de Gestión de Incidencias o IMS).

Incidencias

Las incidencias de carretera comprenden todos aquellos eventos no recurrentes que resultan en congestión o perturbación del tráfico, incluyendo: accidentes, averías, escombros, vertidos de cargas, inclemencias del tiempo, reparaciones imprevistas, actividades de construcción y cualquier otro evento inusual o singular que afecte a un vial. Lo habitual es que esta clase de eventos provoquen una pérdida de capacidad y la formación de colas debido a que el volumen excede dicha capacidad tras la caída. Son las principales causantes del retraso en los viajes y tienen consecuencias graves para la seguridad, congestión, medio ambiente y el coste del trayecto (Mahmassani et al, 1998). Investigaciones previas indican que las incidencias son una de las mayores causas de pérdidas de tiempo y costes evitables en

redes de transporte en los Estados Unidos. Estos problemas son de especial gravedad en si se dan en un vial con un gran impacto económico; tal es el caso de las incidencias en los accesos de las ciudades. En la siguiente figura puede observarse el desglose de las causas de la congestión en Estados Unidos:

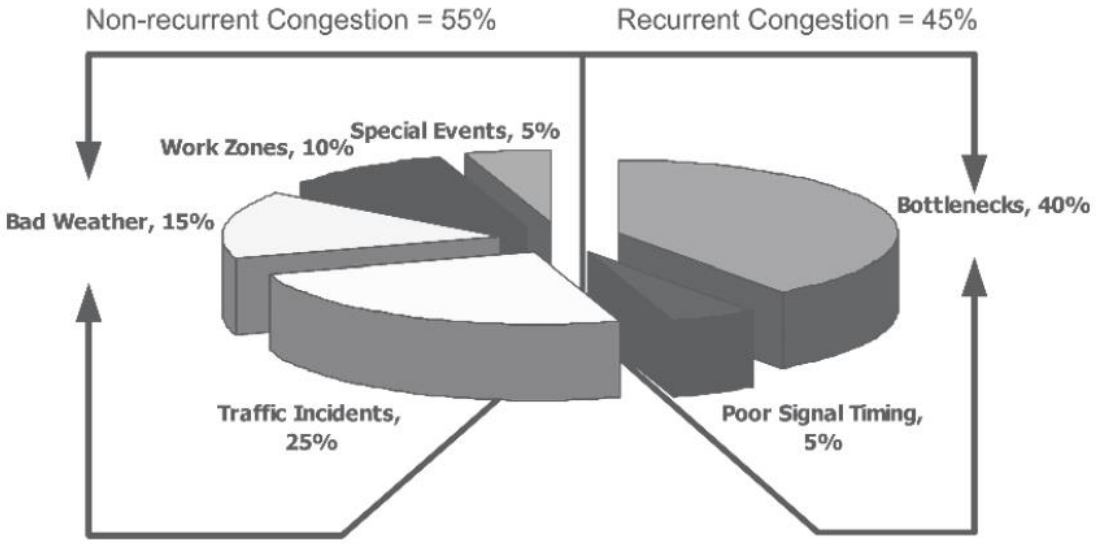


Figura 1: Causas de la congestión en Estados Unidos. Congestión recurrente y no recurrente. (Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management

Si además la incidencia se da en un punto comprometedor como puede ser uno de los accesos a una ciudad, el efecto se agrava por el volumen de tráfico afectado y la importancia económica de ese vial. Una incidencia en uno de los accesos a una ciudad supone:

- Perjuicio material y humano: Una incidencia (avería, siniestro, deslizamiento de tierras…) puede suponer un daño que va desde lo material hasta la pérdida de vidas humanas, cuando el evento en sí mismo es destructivo.
- Aumento del riesgo: la existencia de un coche averiado o siniestrado, un deslizamiento de tierra o algún elemento similar en el vial aumenta el riesgo de sufrir un accidente para el resto de usuarios de la vía.
- Pérdida de capacidad: la existencia de un coche averiado o siniestrado, un deslizamiento de tierra o algún elemento similar, además del riesgo de accidente supone una pérdida de capacidad de la red, que agrava los problemas descritos anteriormente. Produce problemas de congestión, con los perjuicios económicos y medioambientales que ello conlleva.
- Pérdida de fiabilidad: la pérdida inesperada de capacidad comporta una pérdida de los tiempos esperados de viaje de los usuarios.

- Aumento del coste del viaje: Todos los efectos anteriores tienen como consecuencia el aumento del coste del trayecto.

Figura 2: Incidencia en una autopista de acceso a Harrison (EE.UU.) que causó varios kilómetros de retenciones.

De estos efectos, los tres últimos se minimizan a través de dos herramientas:

- Una respuesta rápida de los servicios encargados de normalizar la situación de la carretera.
- Una gestión del tráfico que maximice la funcionalidad de la red en las condiciones en las que existe la perturbación.

La primera herramienta es competencia del organismo encargado de la explotación y conservación de la vía y no es objeto del proyecto. La segunda herramienta se vale de IMS para minimizar los efectos de congestión en la red ocasionados por la incidencia. La gestión de incencias es un elemento fundamental de los sistemas ATMS y ATIS. Un IMS (Sistema de Gestión de Incidencias) es un sistema cuyo objetivo es la detección y resolución de incidencias con el fin de restaurar la vía a plena capacidad en el menor tiempo posible, así como proveer los recursos sanitarios y policiales necesarios en la incidencia; por lo que requieren de la coordinación de diferentes agencias y recursos tanto humanos como tecnológicos (Estos sistemas incluyen la detección de incidencias, verificación de la detección, respuesta a la incidencia, y vuelta a la normalidad.

El sistema con mayor potencial para prevenir un cuello de botella en una incidencia es el empleo de señales de tráfico variables (VMS) para alertar a los conductores y sugerir rutas alternativas de las que se tenga también control. El diseño de un sistema adecuado de reenrutamiento permite mantener un balance de carga adecuado en la red en caso de incidencia, y que minimice los efectos de un evento que en caso de producirse podría dar lugar al colapso del acceso de una ciudad importante, bajo un coste muy inferior a sobredimensionar la red.

Objetivos y composición del estudio

Objetivos

Este estudio se ha llevado a cabo con el fin de diseñar un sistema para la gestión de la congestión no recurrente en los accesos de la ciudad de Santander, con una posible implementación en un sistema de gestión del tráfico en tiempo real. El sistema se basará en una estrategia de reenrutamiento materializada en una serie de políticas de actuación que se accionarán dependiendo del estado de la red. Dichas políticas se han determinado mediante microsimulación.

El sistema de reenrutamiento aplicado consiste en un algoritmo de detección de incidencias y una redistribución del tráfico. El algoritmo es el medio por el que el Centro de Control de Tráfico podrá accionar las políticas de reenrutamiento.

Para concretar la estrategia se ha calibrado una red en microsimulación de forma que sea representativa de la hora punta de un día laboral en la ciudad de Santander. A continuación, se ha procedido a calibrar una versión simplificada de un algoritmo de detección de incidencias para dos incidencias tipo. Tras esto, se han testeado una serie de políticas alternativas de redistribución del tráfico hasta hallar una que ofrezca un resultado satisfactorio minimizando el impacto de cada incidencia en el coste del viaje sobre la red.

El sistema se ha planteado para gestionar el tráfico ante incidencias importantes en dos puntos críticos de la red objeto de estudio: el PCTCAN, y el enlace de la S-10 cerca del corte inglés.

El objetivo de todo ello es dotar a la ciudad de un plan de contingencias que minimice la congestión no recurrente inducida por incidencias en sus accesos, reduciendo la vulnerabilidad de su red y aumentando la fiabilidad global de la misma.

Composición

El presente estudio se compone de dos partes diferenciadas.

La primera parte del estudio está asociada a la labor de investigación y documentación bibliográfica que ha sido necesaria para desarrollar el sistema de gestión de incidencias.

Comprende los apartados 1 al 4 del índice: conceptos generales, gestión del tráfico y reenrutamiento, sistemas de detección de incidencias y microsimulación en tiempo real respectivamente.

La segunda parte consiste en la aplicación al caso de Santander. Contiene el desarrollo del modelo de microsimulación en Aimsun y el diseño definitivo del sistema, con la calibración del algoritmo y la determinación de las políticas escogidas, así como la sugerencia de paneles PMS y mensajes. Se detalla en los puntos siguientes del índice. Primero se expone el plan de trabajo general y a continuación se detallan aspectos concretos relativos a la modelización y a la obtención de resultados. El capítulo final consiste en una serie de consideraciones para realizar la implementación correcta de las estrategias propuestas mediante PMS.

2 GESTIÓN DE TRÁFICO. REENRUTAMIENTO.

Gestión activa de tráfico

La gestión activa del tráfico, en contraposición a la gestión espontánea, es la habilidad de gestionar dinámicamente tanto la congestión recurrente como la no recurrente basándose en las condiciones de tráfico prevalentes con el fin de mejorar la fiabilidad de la red a través de la optimización de la capacidad y la minimización de los efectos que afectan negativamente al funcionamiento del sistema de transporte. Este enfoque de gestión de la congestión consiste en una combinación de estrategias operacionales que cuando se aplican de forma oportuna, optimizan el funcionamiento de la infraestructura existente y ofrecen beneficios contrastables a la red de transporte y al público motorizado.

Las principales estrategias de gestión del tráfico son:

- Velocidad variable o armonizada.
- Uso temporal de arcenes.
- Ramp metering.
- Control de intersecciones.
- Gestión de carriles.
- Señalización dinámica.
- Reenrutamiento o dynamic rerouting.

En la siguiente figura se puede observar cuales son los beneficios potenciales de las principales herramientas citadas:

Active Traffic Management Strategy	Potential Benefits												
	Increased throughput	Increased capacity	Decrease in primary incidents	Decrease in secondary incidents	Decrease in incident severity	More uniform speeds	Decreased headways	More uniform driver behavior	Increased trip reliability	Delay onset of freeway breakdown	Reduction in traffic noise	Reduction in emissions	Reduction in fuel consumption
Speed harmonization	●		●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
Temporary shoulder use	●	●							●	●			
Queue warning			●	●	●	●	●	●	●		●	●	●
Dynamic merge control	●	●	●			●		●	●	●	●	●	●
Construction site management	●	●							●		●	●	●
Dynamic truck restrictions	●	●				●		●	●			●	●
Dynamic rerouting and traveler information	●		●	●				●	●			●	●
Dynamic lane markings	●	●							●				
Automated speed enforcement			●		●	●		●	●			●	●

Figura 3: Beneficios potenciales de la gestión activa de tráfico.

Se mejora la eficiencia y la seguridad de estas estrategias a través del uso de sistemas integrados que se valen de los desarrollos en las tecnologías de la información para el despliegue automático de medidas que mejora el funcionamiento respecto a la puesta en marcha de herramientas manuales.

El presente estudio pretende diseñar un sistema adecuado para gestionar la congestión no recurrente vinculada a incidencias en los accesos de la ciudad de Santander.

Una incidencia puede provocar fácilmente el cierre de uno o más carriles dependiendo de su gravedad. La magnitud de los cierres de tráfico es especialmente acusada en los casos en los que hay víctimas mortales o con riesgo de muerte, en los que además de los servicios de reparación y emergencia tienen que desplegarse efectivos de la policía para realizar las investigaciones pertinentes antes de restablecer la zona del siniestro, lo que puede durar horas, ocasionando largas colas que pueden inhabilitar una autovía durante franjas enteras del día. Se puede conocer cual es la distribución de incidencias según tipología en la siguiente figura:

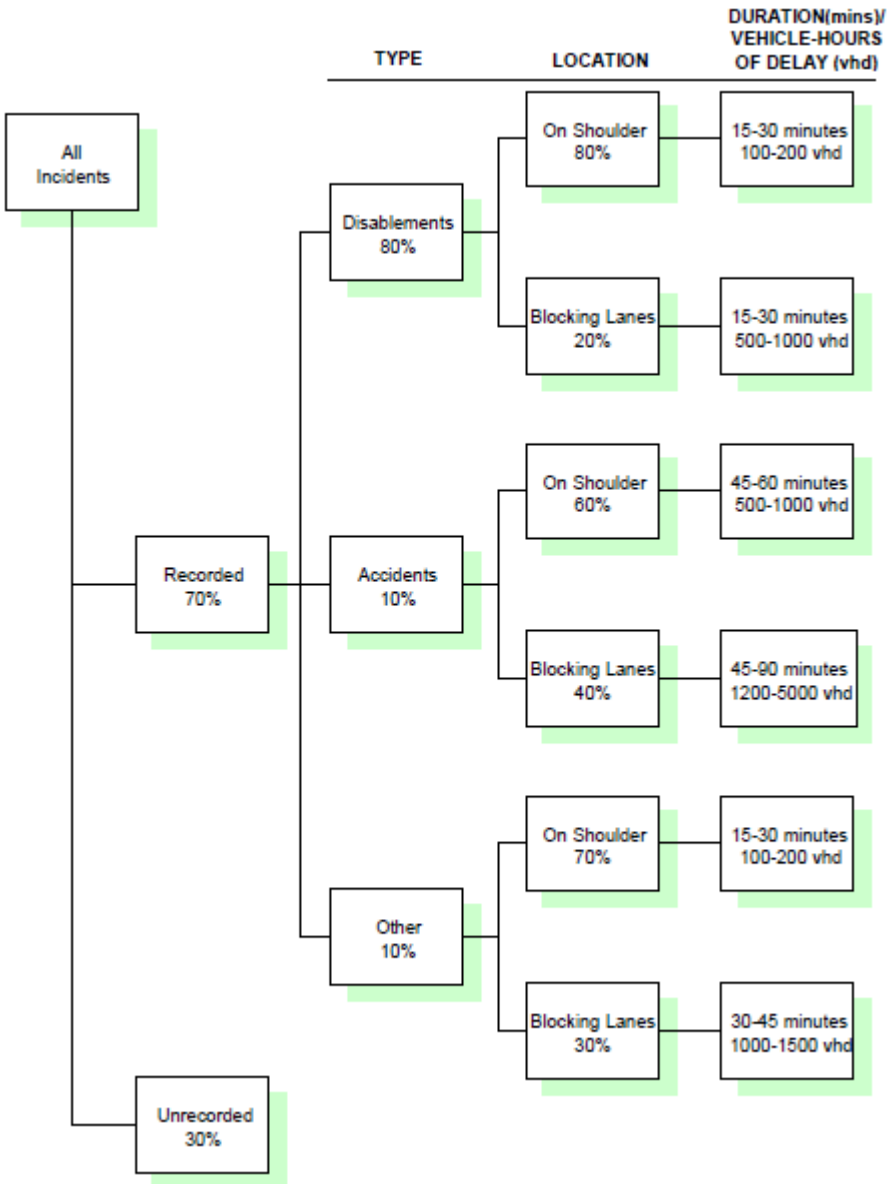


Figura 4: Distribución de incidencias, duración y retraso que imponen. (Fuente: Cambridge Systematics.)

Para entender mejor el impacto de las incidencias descritas en la figura anterior, se muestra la siguiente tabla con la pérdida de capacidad que suponen:

Tabla 1: Pérdida porcentual de capacidad según magnitud de la vía y de la incidencia (Fuente: Traffic Incident Management Handbook)

NÚMERO DE CARRILES EN CADA SENTIDO DE LA VÍA	AFECCIÓN				
	Inhabilitación de arcén	**Accidente en arcén**	**Un carril bloqueado**	**Dos carriles bloqueados**	**Tres carriles bloqueados**
2	0.95	0.81	0.35	0.00	N/A
3	0.99	0.83	0.49	0.17	0.00
4	0.99	0.85	0.58	0.25	0.13
5	0.99	0.87	0.65	0.40	0.20
6	0.99	0.89	0.71	0.50	0.25
7	0.99	0.91	0.75	0.57	0.36
8	0.99	0.93	0.78	0.63	0.41

Como vemos, el 80% de las incidencias registradas se corresponde con averías, la mayoría de las cuales son en el arcén con un impacto mínimo en la capacidad. Cuando la avería es en un carril (16% de los casos) la pérdida de capacidad ya es suficiente para provocar congestión y colas fácilmente. Sin embargo los accidentes, por su aparatosidad son los elementos más delicados. Requieren de un mayor trabajo de índole policial y sanitario y llevan más tiempo de despejar (especialmente si el accidente reviste gravedad), siendo un 6% de los casos totales accidentes dentro de los carriles. Un 3% de las incidencias se corresponde también con incidencias de otro tipo (deslizamientos de tierra, obras imprevistas, socavones…) que afectan a algún carril restringiendo significativamente la capacidad.

Para los casos en los que la capacidad de la vía queda gravemente restringida la estrategia con mayor potencial para minimizar la afección al tráfico de la incidencia es el reenrutamiento dinámico de vehículos o *Dynamic Rerouting*.

Reenrutamiento o Dynamic Rerouting

El reenrutamiento dinámico de vehículos o *Dynamic Rerouting* es la estrategia por la cual se indica a los vehículos un cambio en la ruta durante su viaje haciendo uso de elementos de señalización variable (VMS) tal que se prevenga el uso de un vial o de una sección concreta que

haya sufrido una caída de capacidad imprevista e importante, con el fin de prevenir la congestión y la propagación de una cola muy larga.

Diseño de un sistema de reenrutamiento

Un sistema de reenrutamiento eficaz debe ser rápido, fiable y seguro:

- La rapidez del sistema está basada en la capacidad de detectar la incidencia. Para ello debe implementarse un sistema de detección automática de incidencias (AID). Estos sistemas usan detectores de tráfico y algoritmos lógicos para determinar la existencia de una incidencia con el fin de dar una respuesta eficaz a la misma. La detección de incidencias se expone en el punto 3 del estudio.
- La fiabilidad del sistema está determinada por el potencial que tiene la nueva distribución de tráfico de prevenir la congestión y el colapso que se produciría en caso de no aplicarse ningún sistema de reenrutamiento.
- La seguridad es un objetivo prioritario de cualquier sistema de reenrutamiento. Los vehículos tienen que adaptar su velocidad al cambio de condiciones, para realizar los cambios de ruta con seguridad y evitar que se produzcan más incidencias como consecuencia de la primera.

En general, los aspectos a analizar para diseñar un plan de reenrutamiento son los siguientes:

- El volumen de tráfico.
- El porcentaje de vehículos pesados.
- El transporte público.
- Puntos posibles de comienzo y final de la vía de reenrutamiento.
- Seguridad en la red con reenrutamiento, especialmente considerando a los usuarios de la calzada no protegidos.
- La existencia de edificios residenciales, escuelas y lugares de recreo a lo largo de la red de reenrutamiento.
- Molestias debido al ruido o la contaminación del aire.
- Accesibilidad en la red de reenrutamiento.
- Limitaciones por mercancías peligrosas, longitud de vehículos, anchura y gálibo máximos en la red de reenrutamiento.
- Categoría de tráfico en la red de reenrutamiento.

Para diseñar un reenrutamiento es necesario:

1. Determinar la zona vulnerable que será protegida con el reenrutamiento.
2. Determinar el tráfico que discurre por ese vial: composición y caracterización del flujo.
3. Diseñar el sistema de detección de incidencias.
4. Encontrar una ruta alternativa que sirva a los usuarios del vial afectado. Existen dos tipos de reenrutamiento:
    - **Reenrutar por otra carretera:** Se emplea otra carretera cuando el tráfico es dirigido más allá de la incidencia a través de una calzada viable de la red circundante a la zona de la incidencia. En este caso el reenrutamiento comienza en una intersección donde la vía de reentutamiento conecta con la principal, y termina en una intersección en la que el tráfico pueda volver a la ruta principal.
    - **Reenrutar por la propia carretera con la incidencia:** En este caso el tráfico evita la incidencia desviándose por uno de los carriles de la propia calzada. En estos casos puede ser preceptivo retirar elementos que separen los carriles o los sentidos de circulación, o aprovechar comunicaciones existentes entre los mismos. Existen dos subcasos distintos dentro de esta tipología:
        - **El carril de desvío conserva su sentido:** En este caso, la incidencia deja algún carril por el que la circulación es viable en la calzada, y trata de canalizarse el tráfico por ese carril desde antes de que la incidencia sea visible.
        - **El carril de desvío no conserva su sentido:** En este caso, un sentido de la calzada está inutilizable y se opta por utilizar un carril del sentido contrario para atravesar la incidencia, protegiéndolo. En este caso es especialmente importante el uso de señalización adicional o incluso operarios que guíen el tráfico.
5. Caracterizar la velocidad en los tramos afectados por el reenrutamiento para que el tráfico sea compatible con la situación de emergencia.
6. Diseñar el sistema de información a los usuarios para que sea posible el reenrutamiento.
7. Comprobar que el tráfico no es incompatible con los cambios de ruta propuestos. Este paso es innecesario si el tráfico se bypassea por el mismo vial.
8. Comprobar la efectividad del plan para mitigar la congestión no recurrente. Para este propósito es preceptivo el empleo de la microsimulación.

Este proceso debe realizarse para cada reenrutamiento del plan.

Sistemas de reenrutamiento actuales

No existe una implementación muy extendida de planes de reenrutamiento en la actualidad. El reenrutamiento es un recurso que resulta útil en multitud de escenarios existentes actualmente, pero no se diseñan sistemas de forma tan específica como se hacen para otras estrategias de gestión activa del tráfico como el *ramp metering* o la *speed harmonization*, sistemas sobre los que existe más investigación y conocimiento.

Sin embargo, existen ejemplos de sistemas de reenrutamiento que han sido implementados, analizados y comparados. Los más relevantes son los siguientes:

Alemania

Alemania ha seguido en los últimos años una estrategia dirigida para gestionar la inmensa mayoría de los trayectos dentro de su territorio nacional mediante información estandarizada de tráfico y de viajero en tiempo real (RTTI). Un componente crítico de este objetivo es el uso de tecnologías avanzadas para proveer de información de reenrutamiento a los usuarios. En Alemania son habituales las señales rotacionales variables que facilitan información de las condiciones del tráfico. Si ocurre una incidencia, los operarios del CCT despliegan información de rutas alternativas para los usuarios de la vía. En instalaciones en las que se combina reenrutamiento con la velocidad variable y el uso temporal del arcén, las señales también son capaces de facilitar esa información.

Figura 5: Señal VMS en Alemania con información de reenrutamiento y congestión.

A raíz del aumento del tráfico internacional, se ha percibido que los usuarios extranjeros pueden no percibir correctamente estos mensajes, por lo que Alemania también ha iniciado un esfuerzo para estandarizar los mensajes en las señales de mensaje variable para reducir la

probabilidad de que los usuarios no entiendan bien la información. Por esa razón, estas señales emplean mensajes configurados según una serie de principios básicos:

- Las señales se emplearán sólo para información del tráfico.
- Se emplearán leyendas comprensibles internacionalmente.
- Se empleará el mínimo texto posible.
- Se empleará tanto texto como sea inevitable.
- Preferencia por los símbolos y señales de la convención de Viena.

Otro componente del sistema RTTI alemán es el canal de información del tráfico. Este canal provee información de tráfico a los usuarios a través del GPS de a bordo de forma que puede traducirse desde unidades GPS al lenguaje preferido por el usuario. La mayoría de estos mensajes son generados desde sistemas de detección que se repiten cada 2-3 minutos para garantizar su recepción rápida en la calzada. Numerosas entidades (industria automovilística y de radio, instituciones, empresas privadas de información como clubes de conductores) están facilitando la disponibilidad de estas unidades con el fin de aumentar la penetración de la información en los vehículos a lo largo del país. Esto empezó con los mensajes vía radio pública al comenzar la década de los 60, y desde entonces los mensajes de tráfico se han vuelto más frecuentes debido al aumento de la demanda de tráfico y de la congestión. Ya no existen en la forma de mensajes orales que interrumpen la programación, sino que se transmiten digitalmente codificados a través de frecuencias FM, el llamado Radio Data System (RDS). El canal de tráfico de RDS (RDS-TMC) está operativo desde 1997 en Alemania. En la actualidad, esta clase de mensajes son transmitidos sin interrupciones en los programas en unas 50 cadenas de radio. Por una cuestión legal, la información del tráfico es de libre acceso, aunque existen suministradores independientes que ofrecen información adicional de pago. El desarrollo de esta tecnología ha permitido aplicar reenrutamientos para vías no equipadas con VMS y ha impulsado el desarrollo de nuevos dispositivos de navegación en los vehículos. Habitualmente, bastan de 2 a 5 minutos para proveer información de la congestión. El éxito de este modelo ha contribuido a su propagación internacional a lugares como Estados Unidos, Australia o Singapur. Se está trabajando actualmente en tecnologías con mayor capacidad informativa para incluir información de tráfico a nivel urbano.

Ejemplos de sistemas de reenrutamiento alemanes son:

- Sistema de Dynamic Rerouting *A8 Munich – Salzburg*.
- Rerouting *A5/A6/A81 Leonberg – Walldorf*. (combinado con uso de arcén a lo largo de 42 km).

- Guiado dinámico de tráfico con información de congestión integrada *"dWiSta" A3/A66.*

Con estos sistemas se ha llegado a disminuir el riesgo de accidente por incidencia en un 30%, dándose aumentos del 30% en la capacidad de la vía.

Estados Unidos

En Estados Unidos, diferentes administraciones han diseñado diferentes planes de reenrutamiento que se caracterizan por tener diferentes objetivos, densidad de instalaciones y señalización, métodos empleados para obtener las rutas alternativas y control de calidad del sistema. A continuación se mencionan los planes de reenrutamiento que se han desarrollado en los siguientes siete estados: Idaho, Wisconsin, New Jersey, Washington, Colorado, Arizona y California.

Idaho:

La policía estatal de Idaho –en coordinación con el Idaho Transportation Department (ITD), emergencias, agencias locales y públicas– se pusieron de acuerdo en elaborar el Idaho Transportation Incident Management Plan (Enero 2008). Desde el sitio web de las publicaciones del ITD, el plan fue creado para proveer una respuesta coordinada y eficiente, así como una gestión a cualquier riesgo de tráfico significativo". La clase de incidencias que cubre son choques, coches parados y obstrucciones que requieran del cierre de carriles y control de tráfico. La preocupación es la respuesta lenta a las incidencias y la recuperación posterior del tráfico. El plan contiene rutas alternativas para cada uno de los seis distritos del estado, centrándose en el uso de infraestructura estatal (autopistas, interestatales, rutas estatales…) pero también emplea carreteras locales o del condado cuando no exista la posibilidad de usar una carretera estatal. Un caso particular es el reenrutamiento del distrito 2 que emplea una ruta alternativa que incluye carreteras que discurren por el estado vecino de Washington. El plan provee información sobre procedimientos de notificación, contacto, formación e información genérica sobre los procedimientos de respuesta a una incidencia.

El objetivo del plan es dar una guía para mejorar la coordinación y la comunicación en casos de incidencia con el fin de minimizar el tiempo de recuperación sin sacrificar la calidad de los procesos que tienen lugar en la zona de la incidencia. Las incidencias se clasifican en niveles: el menor nivel es el A (<30 minutos), y los niveles C (30-120 minutos desde incidencia a restauración del tráfico normal) y D (>120 minutos) requieren de la aplicación del reenrutamiento. No se usa señalización especial para asistir en el reenrutamiento. No existen indicadores de eficacia del plan ni una evaluación del control de calidad.

Wisconsin:

El Wisconsin Department of Transportation (WisDOT) elaboró un programa de gestión de incidencias (TIME) que consiste en un programa multidisciplinar y multiagencia dedicado a coordinar la gestión de las incidencias mediante las relaciones y la tecnología. Se publicó un memorándum que documenta el programa.

El objetivo del programa es asegurar la consistencia en el desarrollo e implementación de guías de rutas alternativas de emergencia a lo largo del estado, para lo cual se desarrolló una plantilla en la que se basaron los planes del estado, gracias a lo cual todos tienen una forma y organización similar. Según este plan, tan pronto como se llegue a la escena de una incidencia, debe considerarse la posibilidad de utilizar una ruta alternativa de emergencia, aunque se recomiendan para incidencias con una duración superior a 30 minutos (umbral mínimo establecido para un cierre de calzada o de carril debido a un accidente o evento climático). En el proceso se coordinan departamentos de carreteras, bomberos, sheriff, policía, asistencia sanitaria, grúas y reparaciones, aunque pueden participar otros agentes en algunos casos como asociaciones de vecinos, entidades legislativas, etc. Se ha instalado señalización específica para informar del reenrutamiento, que puede complementarse con el uso de señalización variable portátil que pueda desplegarse y retirarse tras la restauración de la situación. Hasta la fecha, se han implementado rutas de emergencia en varios corredores de Wisconsin y se han obtenido los siguientes beneficios:

- Reducción de colas y de riesgo de choques secundarios.
- Mantenimiento del transporte de mercancías y pasajeros.
- Despliegue eficaz de personal y equipamientos.
- Mejora del tiempo de respuesta.

Las mediciones son relativas al tiempo de respuesta y restauración, retraso, uso de VMS y otros. No hay medidas específicas para el uso de rutas alternativas, aunque los indicadores de tiempo de respuesta, restauración y retraso del tiempo de viaje aportan información indirecta del uso de las rutas alternativas. El plan contempla la revisión continua de los planes de emergencias en encuentros regionales periódicas que se organizan con motivo de revisar el TIME. Aparte de eso, no existen métodos de evaluación de los indicadores de calidad del programa.

New Jersey:

En el caso de New Jersey, se documenta en el *Traffic Mitigation Guidelines for Work Zone Safety and Mobility* del NJ Department of Transportation (DOT, NJDOT), las rutas alternativas son una consideración importante al evaluar estrategias de mitigación del tráfico,

especialmente cuando es importante cerrar el área de trabajo para realizar tareas particulares o cuando distribuir el tráfico pueda aliviar sustancialmente la congestión. Estas estrategias son más apropiadas si existen rutas de capacidad disponible paralelas a la principal y que puedan admitir la misma tipología de tráfico. Se considera que el plan será de aplicabilidad para todos los proyectos de medio a alto impacto.

El objetivo del plan es aportar estrategias de mitigación del tráfico. Se usan rutas alternativas, pero la coordinación es esencial. Es necesario analizar de forma específica el reenrutamiento del tráfico pesado. Se usa una gran variedad de señales para transmitir la información: VMS, señalización pre-construcción, CCTV, Highway Advisory Radio (HAR), etc. Es necesario adaptar los tiempos de la señalización para adaptarla a la demanda, y se informa a los usuarios de reenrutamiento sobre los detalles del desvío (cuando empieza, cuando girar, cuando vuelve a la ruta original…). Se puede complementar con Ramp Metering y se considera el empleo de información in-vehicle. De cara a la medición, se contempla medir la velocidad, volumen y retraso para comparar todas las estrategias de ATMS empleables en el estado, no sólo en la ruta principal sino también en las rutas alternativas. Las mediciones típicas son:

- Volúmenes y aforos de pico (ruta principal y alternativas).
- Rendimiento de los vehículos.
- Ocupación.
- Tráfico peatonal y ciclista en la zona de incidencia.
- Tiempo de viaje y retrasos.
- Ratio de colisiones.

Las mediciones se realizan antes, durante y después del evento de cierre para observar el impacto a corto y medio plazo. También es necesario emplear corredores similares no afectados como sistema de control. La monitorización del retraso en las rutas alternativas sirve para indicar si es necesario optimizar el sistema. Los métodos de evaluación de los indicadores establecidos son aforos, observación, encuestas, videograbación (corto y largo plazo), etc.

Figura 6: Especificación NJDOT de la jurisdicción de señalización de tráfico en una ruta alternativa.

Washington:

En Julio de 2002 el Washington State Patrol WSP, el WSDOT y el Washington State Association of Fire Chiefs (WSAFC) propusieron un plan para coordinar sus esfuerzos y recursos para responder, mitigar, investigar y restaurar incidencias en autopistas y rutas de ferry, que se implementó en el Joint Operation Policy Statement (JOPS). En este documento se detallan los procedimientos y responsabilidades de gestión de tráfico, así como la vialidad invernal y las condiciones seguras de trabajo. En el Condado de Thurston se desarrolló un sistema coordinado para desviar el tráfico alrededor de las incidencias en la interestatal 5 y la US Highway 101, que se llamó *Incident Management Handbook for the I-5 Thurston County Corridor.*

El objetivo del plan es manejar de forma más eficaz el tráfico en la autopista y en las arterias principales cuando una incidencia grave sucede en la autopista. El tráfico es desviado en las calles circundantes a incidencias que bloqueen los carriles por un tiempo esperado superior a 2 horas. El plan ayuda a gestionar la inevitable sobrecarga de tráfico en la ciudad y en las carreteras condales tratando de minimizar la frustración del usuario y mejorando la seguridad. Se crearon Equipos de Respuesta a Incidencias (IRTs) disponibles 24/7 que patrullan las zonas congestionadas en coordinación con la WSP y otras agencias para ofrecer una respuesta, guía y restauración rápida en casos de avería y colisión, y previenen las colisiones secundarias. Como parte del plan se desarrollaron mapas de rutas alternativas, un plan de señalización, un plan de control del tráfico y un plan de comunicación. El WSP, como agencia de campo líder, hace el llamamiento al desvío desencadenando la cadena coordinada de eventos con las distintas agencias

locales y estatales. El reconocimiento de las agencias del trabajo de todos es vital para lograr los objetivos. No se especifican mediciones para comprobar el funcionamiento del sistema.

Colorado:

El CDOT ha desarrollado numerosos planes de gestión de incidencias a lo largo del estado a raíz de la redacción de *Guidelines for Traffic Incident Management in Work Zones (2008)*:

- North I-15 – Weld/Larimer Counties
- US-36 – I-25 to Boulder
- I-25 – Express Lanes
- T-REX Traffic Incident Management Plan – I-25 Broadway to Lincoln Avenue, I-225 Parkway to I-25
- South I-25 – Douglas County
- DIA – I-225/I-70 Interchange
- 6th Avenue – Kalamath to I-70
- I-70 Mountain Corridor – Morrison to Utah
- I-25 El Paso County
- Pueblo County
- I-25 Trinidad
- Park County Highway Incident Management Program

Todos estos programas fueron creados a través de un proceso de planificación multiagencia coordinado por el CDOT e involucrando agencias de transporte, rescate/bomberos, sanitarios, servicios de grúa, etc. El proceso consiste en la revisión e inclusión de protocolos y convenios. Se informa con anticipación de los cierres de carril previstos además de facilitar un mapa (COTrip, www.cotrip.org) en el que el CDOT provee de información de reenrutamiento en tiempo real actualizada cada 10 minutos.

Cada uno de los programas incluye un manual de respuesta a incidencias que provee una rápida referencia de campo para el personal de respuesta, para asegurar respuestas efectivas y estandarizadas. Se considera la implementación de reenrutamiento para eventos de nivel superior al intermedio (incidencia con cierre no total de calzada durante 30-120 minutos). Cada plan contiene una lista de reenrutamientos predeterminados. Se informa al CDOT TOC del reenrutamiento y éste se encarga de coordinar la información. El T-REX Traffic Incident Management Program (2001) provee las pautas para establecer los reenrutamientos. No se especifican medidas de eficacia para los planes.

Arizona:

En Arizona se redactó el *Statewide Alternate Route Plan (AZ-485, December 1999)*, que incluye pautas para planes de ruta alternativa y operaciones de TMC y Traffic Incident Management (TIM) con participación de múltiples agencias (legales, transporte, rescate, grúa, emergencias, etc.). También provee planes de reenrutamiento para los principales viales de Arizona en formato impreso. Se empleó software GIS para el diseño de los desvíos originales. El resultado es el Alternate Routing Information System (ARIS), que dotó al ADOT de un software en formato uniforme para deteminar las mejores opciones de desvío cuando ocurre una incidencia o un cierre de carril.

ARIS se concibe para ayudar a los operarios de TOC de Phoenix que tienen dificultad para interpretar la extensa variedad de planes de desvío de distrito con diferentes formatos mientras coordinan actividades de gestión de incidencias en todo el estado para los distritos del ADOT. Se emplea un criterio de reenrutamiento basado en las restricciones de tráfico pesado de la red interestatal, las velocidades medias en las vías alternativas y información adicional (puentes, regulación de velocidad en segmentos, segmentos funcionales, localización VMS…). El principal sistema de señalización empleado es VMS. No se especifican medidas de la eficacia de los reenrutamientos.

California:

Se han desarrollado numerosas rutas alternativas en el *Alternate Routes for Traffic Incident (ARTI) Guide (January 2009)* en respuesta a incidencias específicas en el sistema de autopistas. Cada ruta alternativa consiste en la ruta designada así como los elementos que apoyan la implementación. Muchos de los elementos de apoyo no están instalados definitivamente, pero se prevee que formen parte del sistema global en el futuro. En conjunto con la implementación de rutas alternativas regionales por el California Department of Transportation (Caltrans) durante incidencias mayores, la estrategia de distribuir el tráfico a rutas alternativas predeterminadas alrededor de la incidencia facilita el movimiento del tráfico y aumenta la movilidad y fiabilidad del sistema. Algunos ejemplos de desarrollo de rutas alternativas predeterminadas son:

- US 101 – From San Francisco County line to Santa Clara County line
- I-280 – From San Francisco County line to State Route 92 (SR 92)
- I-380 – From US 101 to I-280
- SR-92 – From San Mateo Bridge to I-280

Aunque Caltrans como agencia estatal no tiene ningún plan formalmente desarrollado, para las instalaciones estatales, periódicamente despliega sitios web de información asociados a proyectos específicos que requieren cierres importantes con rutas alternativas.

El objetivo principal de la guía ARTI es gestionar los efectos de la contestión no recurrente en el condado de San Mateo. El documento identifica con anticipación las rutas alternativas utilizables, establece guías de respuesta de gestión de tráfico y facilita la comunicación y coordinación interagencia con el objetivo de proveer un enfoque coordinado con los servicios de emergencia para gestionar el tráfico y optimizarlo. En casos especialmente severos, se considera la posibilidad de conectar múltiples rutas alternativas para evitar colas masivas. La señalización empleada contempla recursos de ATMS como son el ramp metering, el VMS, sistemas de control de tiempos de señalización, CCTV y señalización electrónica. No se especifican medidas de la efectividad de los planes, pero durante una incidencia importante en la US 101, los operarios de Caltrans en el D4 TMC implementan planes de señalización, activan la señalización electrónica a lo largo de las rutas ARTI y notifican a las agencias locales de que la gestión de las rutas alternativas está activada, y se realiza una evaluación del proceso que da lugar a modificaciones posteriores.

3 SISTEMA DE DETECCIÓN DE INCIDENCIAS

Detección de Incidencias

Una rápida y fiable detección de incidencias es vital para reducir la congestión, el retraso y el riesgo potencial derivados de la ocurrencia de la incidencia. Un sistema de detección de incidencias eficaz es fundamental en un sistema de gestión de incidencias (IMS). Determina las acciones que se tomarán y tiene una gran influencia en la eficiencia y fiabilidad de todo el sistema de gestión de incidencias. La disposición de información de detección de incidencias en tiempo real es un elemento integral que sirve de base para la realización de numerosas funciones en la gestión del tráfico, y sin embargo la detección de incidencias es uno de los puntos débiles en la implementación de herramientas ATMS. No obstante, en los últimos años se ha realizado bastante investigación en el área que ha mejorado el aprovechamiento de los sistemas de detección de incidencias, desarrollándose numerosos análisis del funcionamiento de los Detectores Automáticos de Incidencias (AID) existentes.

Afección de las incidencias al tráfico

Es posible detectar las incidencias con elementos de control de tráfico valiéndose de las perturbaciones que éstas causan en el flujo vehicular. La forma en la que una incidencia altera el tráfico responde a una serie de patrones diferenciados. Existen cinco patrones de incidencias definidos (Weil et al. 1998).

El primero se caracteriza por que la capacidad en el punto de la incidencia es menor que el volumen de tráfico afluente. Como resultado, se desarrolla una cola hacia aguas arriba y simultáneamente aparece una región de tráfico ligero aguas abajo. Este es el patrón de tráfico más fácil de detectar y en el que está basado el algoritmo California básico.

El segundo patrón ocurre cuando la condición prevalente (no absoluta) es flujo libre y el impacto de la incidencia es menos severo que en el caso anterior. Esta situación ocurre cuando la capacidad de la vía tras la incidencia sigue siendo superior al volumen que atraviesa el punto durante la incidencia (por ejemplo, un carril ocupado en una autopista de cuatro carriles en la que los tres carriles que restan suman más capacidad de la demandada)

El tercer patrón es un caso más extremo del segundo tipo. En este caso el tráfico en general está en flujo libre con un impacto que no se deja ver en los datos de tráfico. Este caso podría ocurrir en tráfico moderado con un vehículo averiado en un lado de la calzada. Esta clase de patrón es extremadamente difícil de detectar, pero por suerte por su naturaleza no tiene un impacto

en las condiciones de tráfico, luego la detección es necesaria por motivos que afecten a la propia incidencia y no a su influencia en el tráfico.

El cuarto y quinto tipos están vinculados a incidencias con vías muy cargadas de tráfico. En el cuarto caso, la capacidad en la incidencia es menor que el volumen del tráfico aguas abajo. Esta diferencia va a dar lugar a una disipación del problema aguas abajo. Este patrón evoluciona lentamente a no ser que la incidencia sea de carácter severo.

En el quinto tipo, sin embargo, la capacidad en el punto de incidencia es superior al volumen aguas abajo. El efecto de este patrón es que es muy localizado y no discernible en los datos de tráfico. De forma similar al tercer patrón, el quinto es muy difícil de detectar por cualquier sistema de detección automática.

Tipos de Algoritmos de Detección de Incidencias

Los AID están basados en determinados algoritmos que se aplican a datos de tráfico extraídos con una tecnología concreta para detectar una incidencia. En la actualidad existen diferentes tipos de algoritmos con una gran variedad de principios de funcionamiento, complejidad, y datos de entrada. La clasificación más sencilla y práctica de que puede hacerse de los algoritmos existentes es en base a sus principios de funcionamiento, lo que resulta en siete grupos distintos de algoritmos:

1. Algoritmos comparativos.
2. Algoritmos estadísticos.
3. Algoritmos de series temporales.
4. Algoritmos de filtrado o smoothing.
5. Algoritmos de modelado de tráfico.
6. Algoritmos de inteligencia artificial.
7. Algoritmos de procesamiento de imágenes.

Todos estos algoritmos utilizan detectores de loop o emuladores de los mismos desplegados a lo largo de la calzada y son aplicables a autovías y autopistas.

Algoritmos comparativos

Los algoritmos comparativos están diseñados para comparar los valores de parámetros de tráfico (volumen, ocupación, velocidad…) medidos en campo con unos umbrales preestablecidos, de modo que se desencadena la alarma de detección cuando las mediciones superan los umbrales establecidos según el diseño. Los algoritmos comparativos incluyen los algoritmos DT/California/Payne (Payne 1976), el algoritmo PATREG y el algoritmo APID.

Algoritmos estadísticos

Los algoritmos estadísticos usan técnicas estadísticas para determinar cuando los datos de un detector difieren de las características estadísticas del tráfico estimadas o previstas. El Standard Normal Deviate (SND y el Bayesian Algorithm son representativos de este tipo de algoritmos de detección.

Algoritmos de series temporales

Los algoritmos de series temporales asumen que el tráfico normalmente sigue patrones predecibles a lo largo del tiempo. Emplean registros de series temporales para predecir cuales son las condiciones de tráfico normales y detectar incidencias cuando las medidas del detector se desvían significativamente de las salidas del modelo correspondiente. Se han usado numerosas técnicas diferentes para predecir el tráfico a lo largo del tiempo para la detección de incidencias, como el modelo ARIMA y el algoritmo de alta ocupación HIOCC, que se complementa con el PATREG.

Algoritmos de filtrado o smoothing

Las técnincas de filtrado y smoothing están diseñadas para extraer el ruido o las heterogeneidades de los datos de tráfico que causan falsas alarmas y de ese modo permitir que los patrones de tráfico más puros sean más visibles de cara a detectar mejor incidencias verdaderas. La atenuación (del inglés smoothing) es una técnica matemática para producir una media ponderada de una variable de tráfico dada. Los algoritmos de filtrado usan un filtro lineal que permite que los componentes de baja frecuencia del detector pasen mientras se extraen las indeseadas componentes de alta frecuencia. Los altoritmos de filtrado/smoothing representativos son el algoritmo Double Exponential Smoothing (DES), los Low-Pass filter (LPF) y el algoritmo DWT-LDA.

Algoritmos de modelado de tráfico

Los enfoques de modelado de tráfico para la detección de incidencias recurren a la teoría de tráfico para describir y predecir el comportamiento del tráfico bajo condiciones de incidencia. La discriminación entre tráfico con incidencia y tráfico sin incidencia está basada en la comparación entre patrones de tráfico observados y valores de parámetros estimados con modelos. Ejemplos de este tipo de algoritmos son el Dynamic model, el Catastrophe Theory Model (basado en la teoría de catástrofe sobre la variación brusca de la velocidad frente a la continuidad del volumen y la ocupación en el límite entre incidencia y no incidencia) y sus modificaciones, y el algoritmo Low-Volume (LV).

Algoritmos de inteligencia artificial

La Inteligencia Artificial se refiere a la colección de procedimientos que aplican el razonamiento inexacto o "black box" y la incertidumbre en toma de decisiones complejas y procesos de análisis de datos. Las técnicas de inteligencia artificial aplicadas en la detección automática de incidencias incluyen las redes neurales, fuzzy logic, y combinaciones de esas dos técnicas.

Algoritmos de procesamiento de imágenes

Dos tipos de algoritmos de este tipo se han usado en la detección de incidencias. En primer lugar, la unidad de procesamiento de imagen (consistente en una cámara de vigilancia y un ordenador de procesamiento de imagen) que puede usarse como un detector de loop u otro detector fijado para proveer medidas de tráfico como volumen, ocupación, velocidad y/o longitud de cola. El programa de procesamiento extrae las variables de tráfico de las imágenes de video. En segundo lugar, el programa de procesamiento de imagen interpreta toda la imagen de vídeo para encontrar vehículos estacionarios o muy lentos, con el fin de encontrar incidencias. Un algoritmo representativo de esta tipología es el Autoscope Incident Detection Algorithm (AIDA).

Calibración e índices de desempeño

Los algoritmos tienen que calibrarse de forma adecuada para que funcionen de forma eficaz. La calibración se basa en la experiencia, la simulación, y en ocasión en modelos de optimización multidimensionales.

En el caso del algoritmo California, la calibración del algoritmo busca determinar cuál es el vector de umbrales (T1, T2, T3) y la duración de los intervalos temporales tal que el algoritmo detecte el mayor número posible de incidencias con el menor número de falsas alarmas posibles, con un tiempo medio de detección aceptable.

Existen cuatro causas principales para las falsas alarmas. La primera es trivial: mal funcionamiento del detector, que no es infalible y cuyos fallos inducen al sistema a errores; obviamente datos erróneos inducen decisiones erróneas. La segunda causa, que es la mayor causante de falsas alarmas, ocurre en viales con tráfico elevado en las que los vehículos experimentan variaciones de velocidad significantes como el efecto "stop – go". Esto resulta en unos datos de tráfico con ondas de choque que se propagan en la dirección contraria al tráfico. La tercera causa de falsa alarma es la geometría irregular, como los ramales o zonas de trenzado entre detectores de un algoritmo de doble estación. Finalmente, el cuarto tipo de causa de falsas alarmas es la presencia de cuellos de botella normalmente ubicados en puntos que tienen un volumen "on

ramp" sustancial. Esta es la causa más significante de falsas alarmas cuando la demanda exceda la capacidad de la vía que se está analizando.

El desempeño de los algoritmos es evaluado por tres indicadores: el ratio de detección (DR), el ratio de falsa alarma (FAR) y el tiempo medio de detección (MTTD). Estos índices vienen dados por las siguientes expresiones:

$$DR\ (\%) = \frac{número\ de\ detecciones\ precisas}{número\ total\ de\ incidencias} \times 100$$

$$FAR\ (\%) = \frac{número\ de\ falsas\ alarmas}{número\ total\ de\ detecciones} \times 100$$

$$MTTD = \frac{\sum_i (t_i^{est} - t_i^{obs})}{número\ de\ detecciones\ precisas} \quad \because i\ son\ las\ detecciones\ precisas$$

Algoritmo California

La familia de algoritmos elegida para el caso de estudio es la familia del algoritmo California, también llamado algoritmo de Payne o algoritmos de árbol de decisión (DT algorithms). El algoritmo California es el más conocido de todos los algoritmos comparativos y es uno de los más empleados y estudiados para los sistemas de detección de incidencias. Una de las grandes ventajas de este tipo de algoritmo es que es simple e intuitivo. Su funcionamiento se basa en que una incidencia suele causar un significante aumento de la ocupación aguas arriba mientras simultáneamente reduce la ocupación aguas abajo, lo cual aumenta mucho la diferencia de ocupación entre dos puntos situados aguas arriba y aguas debajo de la incidencia. El algoritmo se vale de comparar esa diferencia con unos determinados umbrales para determinar si ha ocurrido una incidencia o no.

La familia de algoritmos de Payne se compone de un algoritmo básico y las sucesivas modificaciones que se han realizado con el fin de emplear una información ligeramente diferente, obtener más datos sobre la incidencia o mejorar el desempeño del algoritmo básico. En la siguiente figura puede apreciarse el árbol de decisión del algoritmo básico de Payne y en la tabla adjunta se observa la descripción de las variables que se emplean.

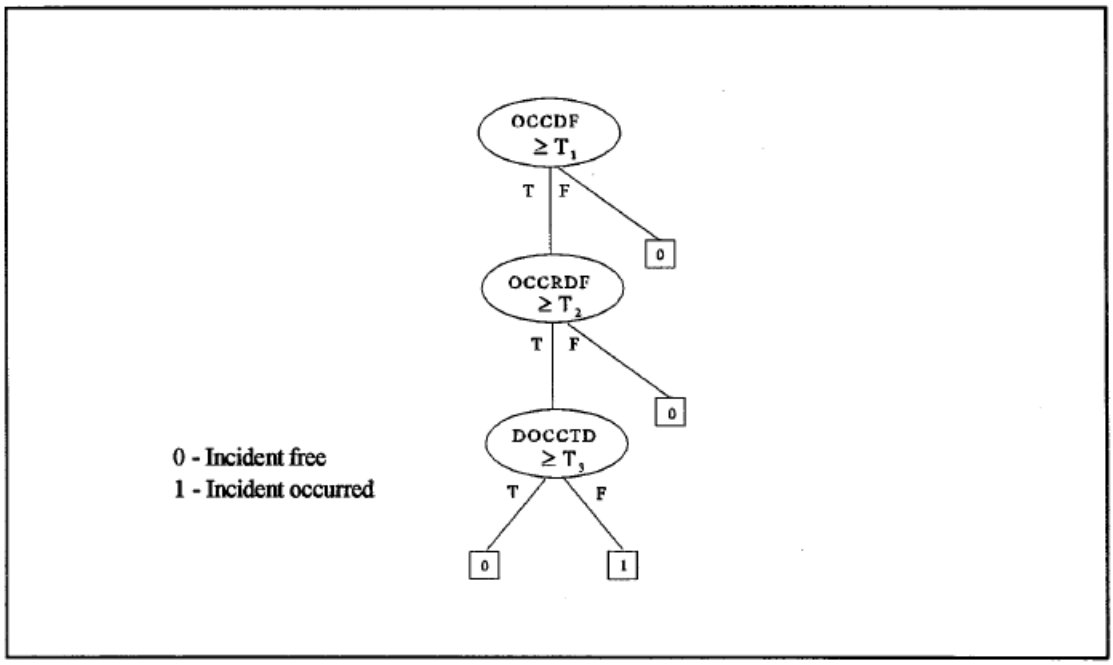


Figura 7: Algoritmo California básico. T1, T2 y T3 son los umbrales con los que se calibra el algoritmo.

Tabla 2: Parámetros empleados en los algoritmos California

Parámetro	Ecuación	Definición
OCC (i,t)	$OCC(i,t)$	Ocupación en la estación i en el intervalo de tiempo t
DOCC (i,t)	$OCC(i+1,t)$	Ocupación aguas abajo de la estación i en el intervalo de tiempo t
OCCDF (i,t)	$OCC(i,t) - OCC(i+1,t)$	Diferencia absoluta espacial de ocupación
OCCRDF (i,t)	$\frac{OCCDF(i,t)}{OCC(i,t)}$	Diferencia relativa espacial de ocupación
DOCCTD (i,t)	$\frac{OCC(i+1,t-2) - OCC(i+1,t)}{OCC(i+1,t-2)}$	Diferencia relativa temporal en ocupación

Estos algoritmos están basados en la ocupación, que ha demostrado ser superior a los algoritmos basados en volumen. Al ser un algoritmo comparativo, requiere de dos estaciones (al

contrario que otros que requieren una sola), lo que implica costes de instalación mayores, y una disminución de la fiabilidad (el sistema falla si se estropea cualquiera de los dos detectores o los dos a la vez). EL algoritmo básico California funciona bien cuando las condiciones antes de la estación de aguas arriba son muy similares a las existentes antes de la estación de aguas abajo para condiciones de tráfico sin incidencias. Si bien es cierto que el usar lecturas diferenciales en vez de medidas absolutas lo hacen menos susceptible a fenómenos confusos como los patrones de tráfico inducidos por el clima, su precisión se ve afectada cuando existen ramales o zonas de trenzado intermedias entre las estaciones.

En la familia California, los algoritmos #7 y #8 son los que han mostrado un mejor desempeño. El California #7 cambia la Diferencia relativa temporal en ocupación (DOCCTD) del tercer test por la medida de ocupación aguas debajo de la estación (DOCC), y se le puede añadir un test de persistencia al incidente. El California #8 es el más complejo, y usa teoría de ondas de choque para complementar la detección.

En la figura siguiente se muestra el California #7 junto con la comprobación de persistencia. El funcionamiento de la comprobación de persistencia es simple: cuando el algoritmo da positivo (se superan los tres umbrales) se declara una tentativa de incidencia. Si en la siguiente medida se vuelve a superar el umbral 2, se aumenta el estado del algoritmo de 1 a 2 y se declara la alarma de incidencia. Este test de persistencia permite al operador saber cuándo la diferencia de ocupación ha sido casual o debida a una incidencia menor o cuando realmente hay un colapso, además de permitir saber cuándo se ha resuelto la incidencia (cuando el umbral 2 deja de ser sobrepasado). En cuanto al desempeño, el test de persistencia reduce el número de falsas alarmas pero aumenta el tiempo medio de respuesta. Cuando este algoritmo fue aplicado a los datos de tráfico de Los Ángeles, su mejor desempeño fue de un ratio de detección del 67%, un ratio de falsas alarmas del 0.134% y un tiempo medio de respuesta de 2.91 minutos.

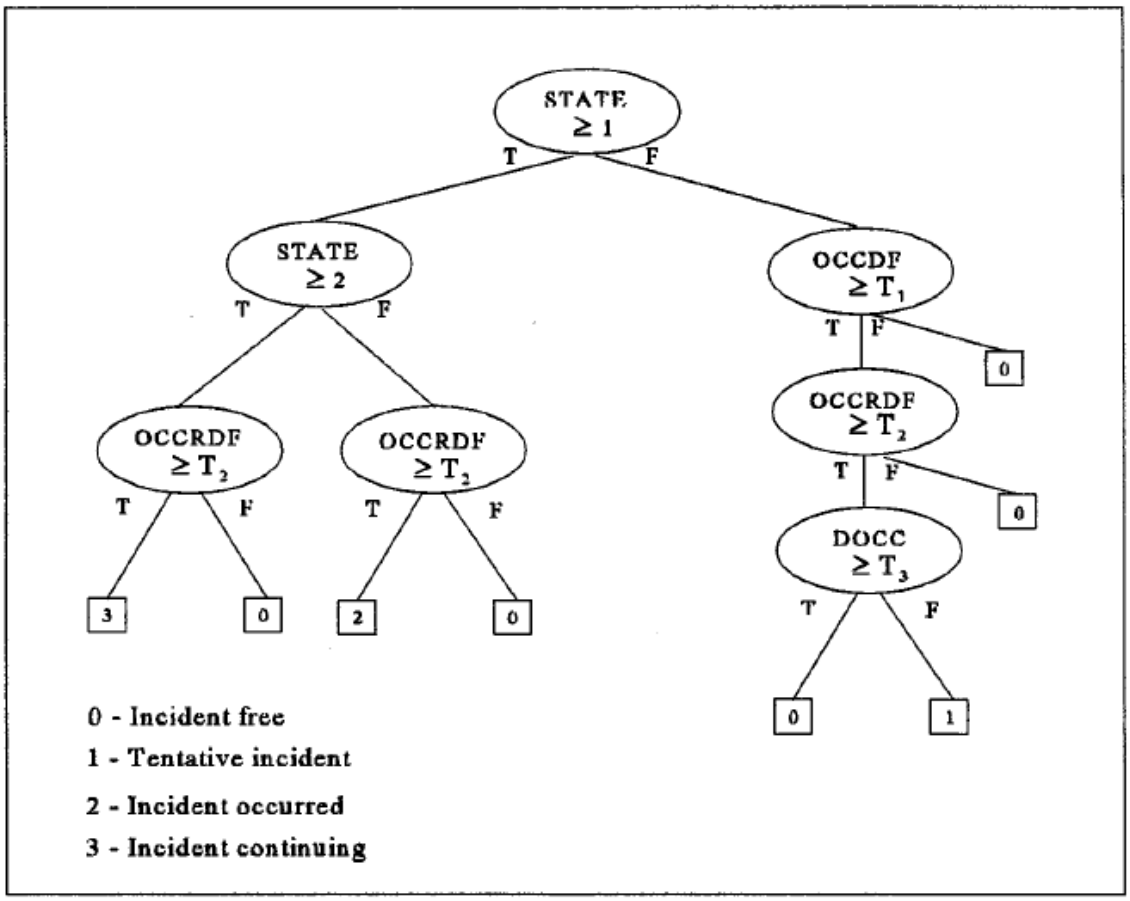


Figura 8: Esquema del algoritmo California #7 con el test de persistencia.

Algoritmo empleado en el estudio

Como se detallará más adelante, el algoritmo empleado para el estudio es una versión simplificada del algoritmo de Payne, basado en la comparación de los valores de ocupación detectados en una pareja de espiras que delimitan la zona en la que se podrá detectar una incidencia.

Se calibrará el umbral del algoritmo en microsimulación para las incidencias simuladas y una vez se compruebe que el algoritmo ofrece una respuesta satisfactoria se procederá a testear las diferentes alternativas de gestión del tráfico.

4 MICROSIMULACIÓN. BASES Y APLICACIÓN EN TIEMPO REAL

Simulación de tráfico. Tipos.

La simulación del tráfico consiste en el modelado digital del tráfico en la red a través de la implementación de unas reglas de comportamiento en un software, con el objetivo de estudiar el comportamiento del tráfico ante una situación hipotética distinta a la actual. La simulación permite evaluar el tráfico en unas condiciones sin que exista la necesidad de que esas condiciones se hayan dado en la realidad, por lo que tiene numerosas aplicaciones, que dependen de las características del tráfico que el sistema es capaz de modelizar.

Existen tres grandes tipos de simulación de tráfico, macrosimulación, mesosimulación y microsimulación.

- La macrosimulación modela el tráfico como un fluido, lo que implica que los vehículos se estudian de forma agregada, no se distinguen. Del mismo modo, las reglas de comportamiento son agregadas, (la capacidad de los elementos de la red es una cualidad explícita e independiente del comportamiento del tráfico). Es muy eficiente computacionalmente y es especialmente útil para estudios de demanda y aprovechamiento de infraestructuras en redes grandes.
- La mesosimulación utiliza funciones de comportamiento agregadas del mismo modo que la macrosimulación (capacidad explícita), pero los vehículos se representan por paquetes discretos. Esto permite la modelización de algunos fenómenos locales como la propagación de colas en las intersecciones, que se estudian como servidores de colas de los paquetes de vehículos que dividen el vial en dos zonas con una frontera móvil: la congestionada y la no congestionada.
- La microsimulación modela los vehículos individualmente, y las funciones de comportamiento son desagregadas, de forma que la capacidad de un vial o una intersección se obtiene como el resultado de la cantidad de vehículos que pueden circular por unidad de tiempo por el elemento como consecuencia de las características geométricas del elemento, su espacio disponible, las reglas de circulación y las interacciones de los vehículos a su paso por el elemento. Requieren más esfuerzo computacional, pero permiten estudiar aplicaciones de tráfico que dependen de la interacción de los vehículos individuales.

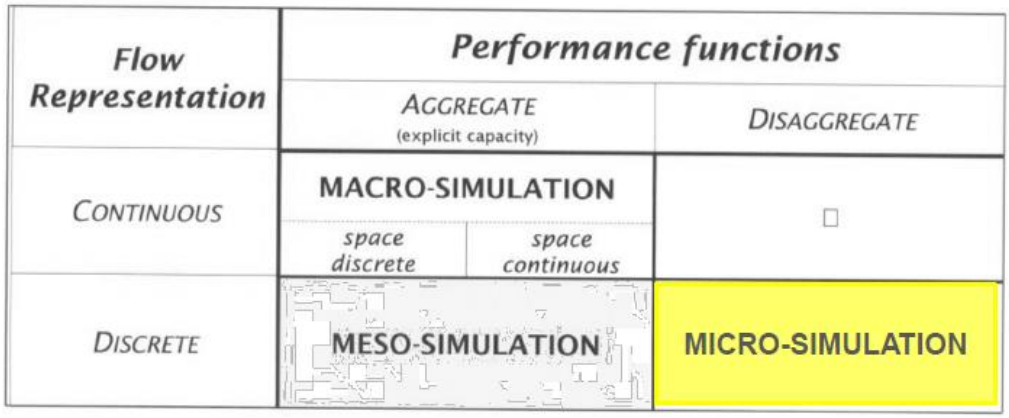


Figura 9: Tipos de simulación de tráfico

Microsimulación

Al contrario que los métodos de predicción analíticos tradicionales y la simulación del tráfico agregado, la simulación de vehículos individuales permite una emulación explícita y fidedigna de políticas ITS como:

- Ramp metering.
- Coordinación de señalización.
- Reversiones de carril.
- Límites de velocidad variables.
- Sistemas de información variables (por ejemplo con información de reenrutamiento).

El presente estudio se vale de la microsimulación para hacer un estudio de las políticas que se sugieren para mejorar el tráfico en caso de incidencia en los accesos de Santander. La microsimulación consiste en la modelización de la red y el tráfico mediante la representación de los vehículos individuales en la red. Para poder utilizarse, el modelo debe ser construido, calibrado, validado, y entonces puede considerarse que representa la realidad de forma suficientemente fidedigna para poder asumir los resultados vinculados a cambios en la red que sólo existen en el modelo. Los parámetros que es necesario calibrar y validar, son aquellos que definen los elementos de los que se compone el modelo así como los que definen las funciones de comportamiento:

- Red de tráfico: los viales e intersecciones deben estar correctamente representados, así como las instalaciones de tráfico (detectores, paneles VMS).

- Demanda de tráfico: el movimiento de los vehículos según unos patrones determinados puede implementarse como una matriz Orígen – Destino o mediante estados de tráfico (vehículos entrantes, salientes y porcentajes de giro)
- Control de tráfico: las reglas y tiempos que rigen las intersecciones.
- Transporte público: líneas y horarios.
- Parámetros de comportamiento.En el modelo, el movimiento de un vehículo depende de su comportamiento y el de los vehículos con los que se relaciona. Las relaciones entre los vehículos (y por ende su movimiento y posición) se resuelven mediante la aplicación de dos modelos de comportamiento:
  - Car following (seguimiento de vehículos).
  - Lane changing (cambio de carril).
    - Elección de carril objetivo.
    - Gap acceptance (aceptación de hueco).

Car Following

En cada ciclo de simulación se actualiza la posición de cada vehículo de acuerdo con el siguiente evento:

Si es necesario cambiar de carril, se aplica el modelo de *Lane-Changing.*

Si no es necesario cambiar de carril, se aplica el modelo de *Car-Following*.

El modelo de *Car-Following* es la herramienta empleada para determinar el comportamiento de un vehículo v_n que no tiene la necesidad de cambiar de carril en función de los vehículos que le preceden v_{n-i}. Existen tres variantes:

- Modelos basados en distancia: el parámetro que influye en la respuesta del vehículo v_{n+1} es la distancia que mantiene con el vehículo precedente v_n durante el ciclo de simulación.
- Modelos físico-psíquicos: la reacción está basada en la combinación de velocidad relativa y distancia relativa.
- Modelos generales de aceleración basados en el comportamiento diferenciado del vehículo según se encuentre en distintos regímenes como: flujo libre, seguimiento, o frenada de emergencia.

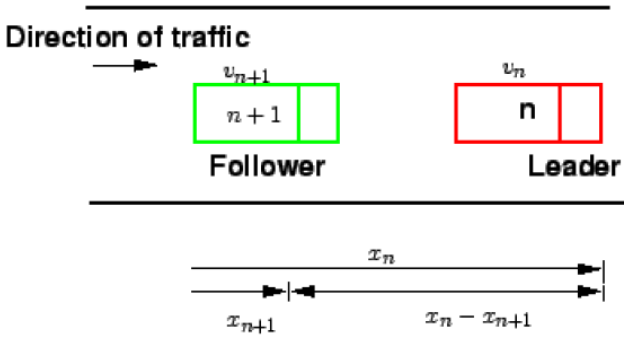


Figura 10: Relación de vehículos en seguimiento

Los dos primeros casos se rigen por la siguiente ecuación básica conductual:

$$Respuesta = Sensibilidad \times Estímulo$$

Donde la sensibilidad puede ser constante o una función también dependiente de la posición o velocidad relativa, y el estímulo es la distancia o una combinación de la distancia y velocidad.

Un ejemplo de modelo basado en regímenes es el modelo empírico basado en GIPPS (1981). Tiene dos componentes:

- Alcanzar la velocidad objetivo, que se calcula como una función de la velocidad deseada por el vehículo y la velocidad aconsejada en su sección.
- Limitaciones impuestas por el vehículo precedente. Estas limitaciones imponen la velocidad segura para un vehículo respecto de su predecesor, que se calcula con las características del propio vehículo y del predecesor: $v_{max}(i, s) = MIN\{S_{lim}(s)*\theta(i), v_{max}(i)\}$ dónde:
  - Velocidad máxima deseada para el vehículo i: $v_{max}(i)$
  - Límite de velocidad de la sección o del giro s: $S_{lim}(s)$
  - Aceptación del límite de velocidad del vehículo i: $\theta(i)$

  La velocidad máxima a la que el vehículo puede acelerar depende de:
  - Velocidad actual del vehículo n.
  - Velocidad objetivo del vehículo n.
  - Capacidad de aceleración.

  La velocidad máxima que el vehículo puede alcanzar en función de las restricciones de tráfico depende de:
  - Velocidad actual del vehículo n.
  - Condiciones del vehículo precedente.
  - Capacidad de frenado.

La velocidad al final del intervalo será la máxima de las dos anteriores.

Lane Changing

Como se ha explicado anteriormente, en cada ciclo de simulación se actualiza la posición de cada vehículo de acuerdo con el siguiente evento:

Si es necesario cambiar de carril, se aplica el modelo de *Lane-Changing.*

Si no es necesario cambiar de carril, se aplica el modelo de *Car-Following.*

El modelo de *Lane-Changing* es la herramienta empleada para determinar el comportamiento de un vehículo que tiene la necesidad de cambiar de carril en función de la motivación del cambio de carril y la situación del vehículo y del tráfico que le rodea.

El primer punto a comprobar es la necesidad de cambio de carril. Esta necesidad puede ser de carácter obligatorio (para seguir una determinada ruta), u opcional, cuando está motivado por una optimización de su trayecto o el de los demás vehículos (adelantamiento, alcanzar un carril de mayor velocidad, evitar/facilitar incorporaciones…).

El modelo de *Lane-Changing* se implementa a través de dos submodelos consecutivos. El primero es el modelo de Elección de carril, por el cual el vehículo elige el carril objetivo al que se quiere cambiar. El segundo es el modelo de Gap Acceptance, a través del cual el vehículo evalúa la posibilidad de cambiar de carril en función de las condiciones de tráfico que le rodean, y de su urgencia para el cambio.

La elección del carril objetivo se hace mediante un modelo Logit de maximización de utilidad del carril *i* entre los carriles disponibles *j*:

$$P(i_{nt}|v_n) = \frac{\exp(\beta^{TL^T} X_{nt}^i + \alpha^i v_n)}{\sum_j \exp(\beta^{TL^T} X_{nt}^j + \alpha^j v_n)}$$

Dónde:

- $X_{nt}^i = atributos\ del\ carril\ i\ para\ el\ vehículo\ n.$ X_{nt}^i incluye:
  - Atributos del carril (velocidad, densidad, anticipación (conductores miopes vs previsores)
  - Posición actual del vehículo.
  - Plan de ruta (distancia a la salida d, la cual puede no ser visualizada…).
- $\beta^{TL} = coeficientes\ LOGIT$
- $v_n = efecto\ aleatorio\ específico\ individual. v_n \sim N(0,1)$
- $\alpha^i = coeficiente\ del\ efecto\ aleatorio\ esp.\ individual\ \ para\ el\ carril\ i$

Los cambios en el proceso de decisión de cambio de carril se modelan usando tres zonas que nacen desde al próximo giro hacia aguas arriba:

Las diferentes zonas corresponden a un tipo de motivación diferente con respecto al cambio de carril:

- Zona 1: Esta es la zona más alejada del siguiente punto de giro. La influencia del siguiente giro no se tiene en cuenta aún, por lo que las decisiones de cambio de carril se rigen principalmente por la optimización del trayecto. Para medir la utilidad que hará que el conductor cambie de carril se consideran varios parámetros del vehículo y los que le rodean. (velocidad deseada de los conductores, la velocidad actual y la distancia del vehículo, la velocidad anterior y la distancia del vehículo precedente en el futuro carril de destino).
- Zona 2: Se trata de la zona en la que el vehículo ya tiene en cuenta el próximo giro para la búsqueda del carril objetivo, pero realiza el proceso con paciencia. Los vehículos van en busca de un hueco y pueden tratar de adaptarse a él, pero no afectan el comportamiento de los vehículos en los carriles adyacentes.
- Zona 3: Esta es la distancia más corta hasta el siguiente punto de giro. Los vehículos están presionados para llegar al carril objetivo en relación con el giro, y no pueden posponerlo más. Para ello pueden reducir la velocidad si es necesario, e incluso llegar a una parada completa con el fin de hacer el cambio posible. Además, los vehículos en el carril adyacente pueden ver modificado su comportamiento.

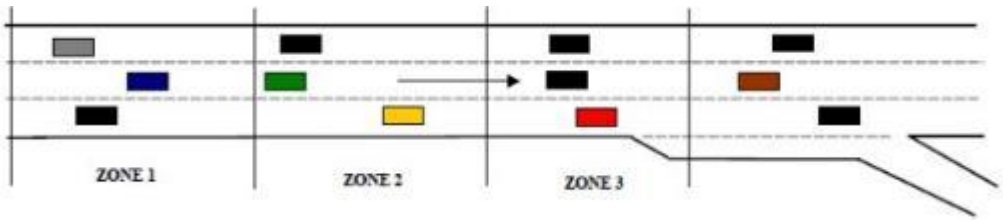


Figura 11: Zonas de cambio de carril vinculadas al giro que supone el ramal de salida del vial.

En resumen, el cambio de carril se produce si la respuesta a las siguientes preguntas es afirmativa:

1. ¿Necesito cambiar de carril / deseo cambiar de carril?
2. ¿En caso de que el cambio no sea necesario, las condiciones de tráfico son mejores en el carril objetivo?
3. ¿Es factible el cambio de carril?

Figura 12: Ejemplo de 3 situaciones de Lane-Changing: Necesidad de cambio de carril, cambio deseado (para adelantar) pero empeoramiento del trayecto y cambio no posible por línea continua.

Finalmente, el cambio de carril se materializa con el modelo de Gap Acceptance o Aceptación de Hueco. Es el modelo a través del cual un vehículo decide ocupar una posición en condiciones de no prioridad (por ejemplo, un cambio de carril) basándose en el tiempo y espacio disponible para la maniobra (que depende de factores como la velocidad y posición del propio vehículo y la velocidad y posición del vehículo en conflicto) y de parámetros relacionados con la agresividad o cortesía de los distintos vehículos. El funcionamiento del modelo puede entenderse en el siguiente algoritmo, empleado para determinar si un vehículo:

Dado un vehículo VEHY susceptible de ceder el paso o cruzar el punto de ceda el paso ante la proximidad de vehículos prioritarios:

1. Obtener el vehículo más prioritario (VEHP)
2. Determinar el punto teórico de conflicto (TCP)
3. Calcular el tiempo (TC1) que necesita VEHY para alcanzar el punto de conflicto.
4. Calcular el tiempo estimado (ETP1) que necesita el vehículo prioritario para alcanzar el punto de conflicto
5. Calcular el tiempo (TC2) que necesita VEHY para dejar libre la intersección, es decir para cruzar completamente el punto de conflicto (TPC)
6. Calcular el tiempo estimado (ETP2) que necesita un vehículo prioritario para dejar libre la intersección. (TPP)

Si TC2 + margen de seguridad < ETP1: a VEHY le da tiempo a cruzar antes de la llegada del vehículo prioritario, luego cruza.

Si no:

Si ETP2 + margen de seguridad < TC1: el vehículo prioritario cruza antes de que llegue VEHY, por lo que se busca el siguiente vehículo más prioritario y se repite desde el paso 2 (determinar el TCP).

Si no: VEHY debe ceder el paso, desacelerando y deteniéndose del todo si fuera necesario.

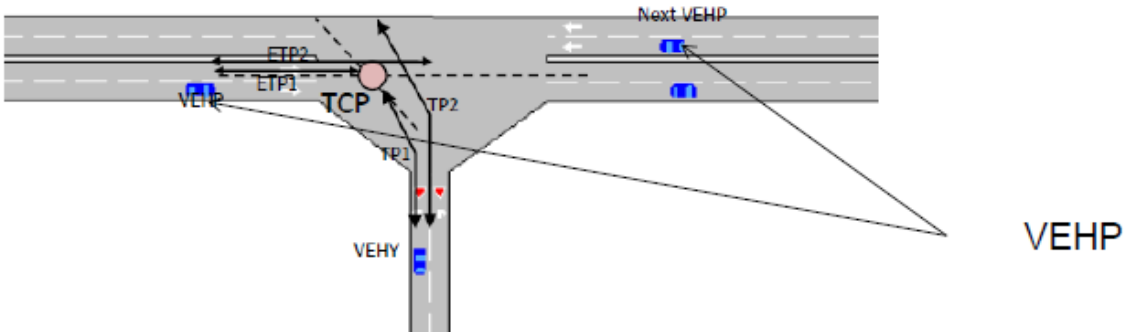


Figura 13: Expresión gráfica del algoritmo de ejemplo de Gap Acceptance.

En un modelo de microsimulación, es necesario parametrizar correctamente los elementos descritos, desde la tipología de vehículos (tamaños, velocidades máximas) y la red hasta las funciones de comportamiento. Sin embargo, con el fin de dar más realismo a la modelización del tráfico, en muchos casos los parámetros no son escalares si no que están asociados a distribuciones probabilísticas, de forma que haya conductores más rápidos, más lentos, más agresivos o menos previsores que otros. Del mismo modo, los resultados de la simulación son replicaciones con una determinada semilla aleatoria (nunca van a clavar los de la realidad durante el proceso de validación, y tampoco es necesario), y los resultados que ofrece deben ser tenidos en cuenta de forma agregada (a través de un conjunto de replicaciones de las que se puedan extraer conclusiones con cierta significancia estadística).

Microsimulación en tiempo real para HTMS

La microsimulación tiene el potencial de mejorar significativamente la precisión y relevancia de las predicciones de tiempo de viaje, al tener en cuenta los cambios de capacidad (Capacity drop y gridlock) y eventos (incidencias) que ocurren en la red. Es la única técnica disponible para comparar las estrategias de gestión del tráfico complejas que influyen en la propia red y se desarrollan en base a cambios en las interacciones de los vehículos de forma que se consigan:

- Una gestión de incidencias más eficaz y efectiva.
- Reducción del impacto de una incidencia y tiempos de recuperación más rápidos.
- Difusión al público de la información de incidencias más rápida.
- Reducción de recursos humanos.
- Reducción de los tiempos de viaje, y su consecuente beneficio económico.

La forma más avanzada de aplicar la microsimulación a la gestión del tráfico es con los sistemas de simulación en tiempo real. Estos sistemas de microsimulación se emplean como complemento a un HTMS y se implementan en los Centros de Control de Tráfico. En estos casos,

el procesamiento de datos se apoya en software de simulación de alta velocidad para la toma de decisiones. El software procesa constantemente datos del tráfico, que combinados con la microsimulación permiten predecir la congestión antes de que aparezca y seleccionar las mejores estrategias de mitigación, que por lo general son mucho más efectivas antes de que la vía colapse. 5 minutos de datos de tráfico sirven para predecir la media hora siguiente. La microsimulación permite predecir con precisión el comportamiento de tráfico que resultaría de aplicar una determinada gestión o provisión de información en la red.

Figura 14: Centro de Control de Tráfico con un sistema de simulación en tiempo real implementado.

Este sistema toma una reproducción precisa del tráfico actual como punto de partida para el proceso de predicción. Mediante la comparación de los registros de los últimos minutos con los patrones históricos de la base de datos, se obtienen las matrices de viajes (O-D) apropiadas, y se puede simular la red bajo las condiciones de capacidad actuales, que no son las teóricas. Este sofisticado procedimiento basado en simulación se apoya en un análisis de series temporales y no sólo produce estimaciones precisas de tiempos de viaje, también ofrece capacidades de detección avanzada de incidencias.

Esto permite reproducir diferentes estrategias de gestión y evaluar cuantitativamente (enfrentando la estrategia a las condiciones de tráfico actuales) su habilidad para mitigar la congestión previamente a su aplicación en campo.

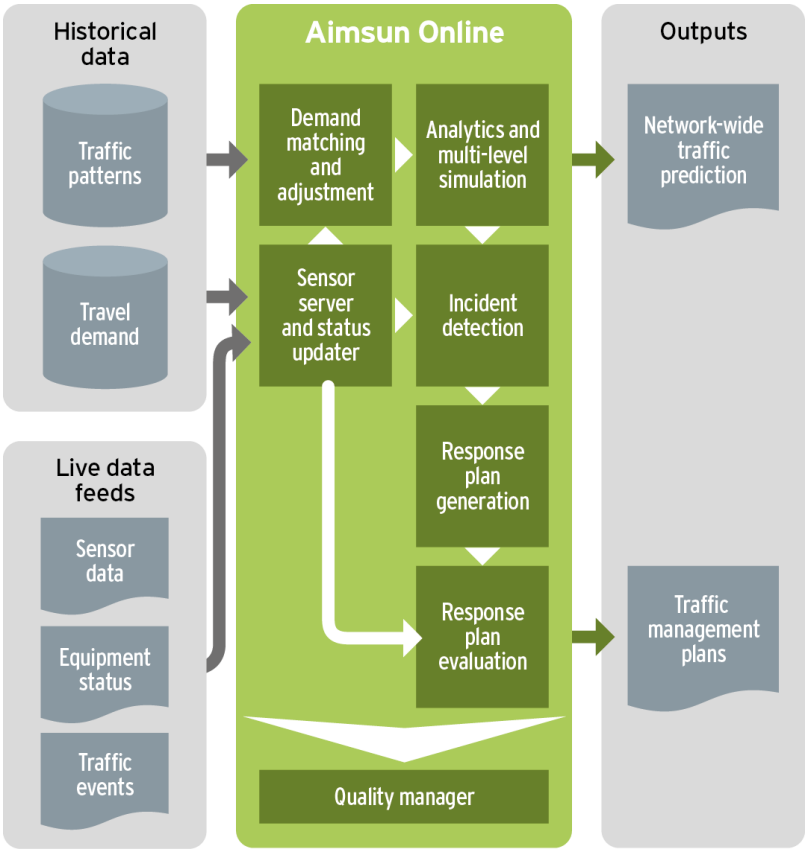


Figura 15: Esquema que ilustra el funcionamiento de un sistema de gestión de tráfico basado en simulación en tiempo real.

Esta comparación entre estrategias es posible por la capacidad del sistema de procesar una cantidad de datos de simulación muy grande a velocidad suficiente. La elección entre estrategias se apoya en unos índices de desempeño determinados en los que el software sintetiza todos los datos que obtiene de la simulación. Esto permite a los operadores del TCC revisar el futuro estado de la red y elegir la mejor estrategia consultando una serie de mapas de temperatura en la que se ven reflejados de forma gráfica la calidad que reflejan los distintos valores de los distintos índices de calidad. En la imagen inferior puede observarse uno de estos mapas. Estas medidas de efectividad no son rígidas, y pueden ser personalizadas de forma que se adecúen correctamente a las políticas de gestión de tráfico que la autoridad competente desea poner en acción. Con acceso a los tiempos de retraso, de viaje, posición, emisiones contaminantes, velocidad, ruta y demás características de los vehículos individuales, la medida de la efectividad de una estrategia puede ser tan compleja como se desee.

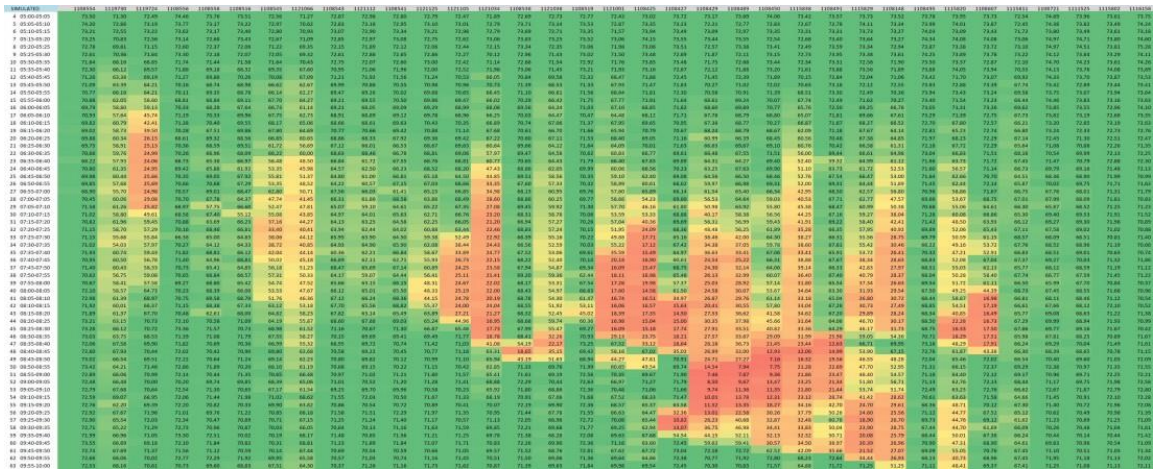


Figura 16: Mapa de temperaturas en el que se aprecia fácilmente la calidad del tráfico para distintos escenarios.

Estos sistemas pueden incluir un módulo que compara los resultados de las predicciones con las mediciones reales una vez el período de simulación ha ocurrido. Los errores de predicción dan lugar a alertas y disminuyen la confianza en las predicciones realizadas en el mismo período, pero la comparación permite a los operadores tomar decisiones informadas y garantiza la disponibilidad de una red y una representación del tráfico frecuentemente actualizados.

Esta clase de programas son el motor de los Sistemas de Información Avanzada de Viajeros (ATIS) o Sistemas de Gestión de Tráfico Avanzada (ATMS) y pueden ser útiles para una variedad de aplicaciones como:

- Gestión activa del transporte y la demanda.
- Gestión de grandes arterias /operación de señales de tráfico.
- Estimación de los costes de la congestión
- Información de transporte en tiempo real.
- Gestión del clima en carretera.
- Gestión de incidencias y eventos.
- Mobilidad y seguridad de la zona de trabajo.

5 SISTEMA DE GESTIÓN PROPUESTO Y METODOLOGÍA GENERAL.

Sistema de gestión de incidencias propuesto

Basándose en la información que se resume en los apartados anteriores, se pretende crear un sistema que, una vez implementado, funcione según el siguiente diagrama de flujo.

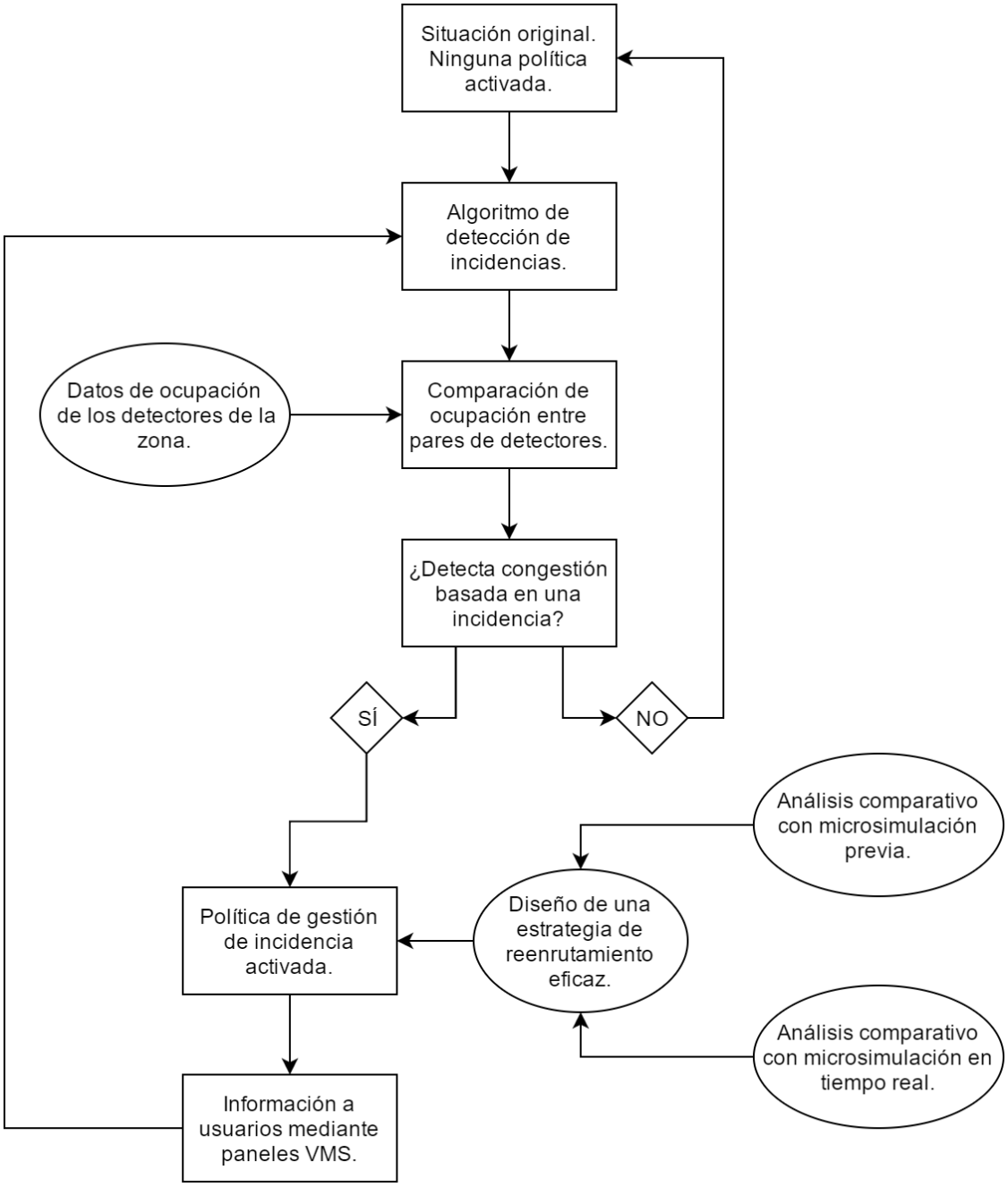


Figura 17: Diagrama de flujo del sistema de gestión de tráfico ante incidencias propuesto.

El diagrama sigue una serie de pasos de forma cíclica para cada intervalo de detección y comprobación de los datos de tráfico con el fin de controlar el estado de la red en lo relativo a estas incidencias:

1. En la situación original, no hay ninguna política activada.
2. Se activa el algoritmo de detección de incidencias, que en este caso en concreto compara los datos de ocupación de los detectores desplegados con el fin de detectar incidencias. Las incidencias pueden ser localizadas aguas abajo del detector cuya ocupación se dispara y aguas arriba del detector cuya ocupación mantiene niveles bajos en comparación, por lo que las parejas de detectores permiten acotar la posición de la incidencia como origen de la congestión.
3. Si el algoritmo no detecta problemas en el tráfico asociables a una incidencia, se vuelve a la situación original, sin políticas activas, y se reinicia el ciclo.
4. Si el algoritmo detecta problemas en el tráfico asociables a una incidencia, se activa una política de gestión de incidencias. Esta política contempla tanto la respuesta a la incidencia (equipos de emergencia, etc.) como la gestión de la congestión derivada. Para ello, se aplica una estrategia de reenrutamiento, que debe ofrecer garantías de eficacia. Para diseñar dicha estrategia existen dos opciones:
    a. Análisis comparativo con microsimulación previa: este es el caso aplicado en el presente estudio. Se modeliza en microsimulación la red afectada, y se modeliza la demanda de forma que la simulación ofrezca una distribución del tráfico asumible para el escenario objetivo del diseño, en este caso, un día laboral en hora punta. Una vez modelado, se somete a la red a unas incidencias representativas del problema que se pretende gestionar, y se realizan simulaciones de diferentes estrategias hasta dar con una que muestre una eficacia significativa.
    b. Análisis comparativo con microsimulación en tiempo real: en este caso, que reviste una mayor complejidad tecnológica, se emplea lo que se ha explicado en el apartado 4 sobre microsimulación en tiempo real. Valiéndose de esta herramienta, se determinaría la estrategia más favorable simulando las condiciones actuales de tráfico, pudiéndose llegar a una conclusión más pormenorizada y eficaz que en el caso anterior.
5. La política de gestión del tráfico ante la incidencia se fundamenta en la transmisión de una serie de información a los usuarios de la red

(fundamentalmente de redireccionamiento, pero también se dan otra clase de avisos, tales como precaución ante la congestión o limitaciones de velocidad). Tras esto, el diagrama vuelve arriba y se comprueba el estado de la red de nuevo. De esta manera se mantiene activada la política en cada ciclo del proceso hasta que el algoritmo de detección de incidencias no detecta congestión y se vuelve a la situación original.

Metodología general

A continuación se expone en términos generales la metodología en que se ha seguido en el estudio para modelizar la red y concretar el algoritmo de detección y las políticas de redireccionamiento del tráfico.

1. **Construcción de la red en Aimsun:** El primer paso es dibujar la red objeto de estudio, que comprende las vías en las que se plantean las incidencias así como todo aquel vial que pueda ser relevante de cara a la materialización del sistema de reenrutamiento de tráfico, o sea necesaria para que la red sea representativa de la existente en los accesos a la ciudad.
2. **Modelización de la demanda de la red en Aimsun:** En el paso anterior se ha modelizado la oferta de transporte que se pretende modelizar, pero para poder diseñar un sistema de gestión del tráfico con el suficiente rigor, es necesario modelizar una demanda que sea representativa de la existente en el caso real para el que se quiere diseñar el sistema de gestión. Para ello, se modeliza una red de detectores a los que se asociarán unos valores de datos de flujo extraídos del mapa de tráfico, y se calibrará una matriz de pares O-D que dé lugar a un tráfico coherente con los datos de tráfico correspondientes a los detectores. Para ello es necesario determinar el período de simulación.
3. **Implementación del algoritmo de detección de incidencias:** Una vez realizados los pasos anteriores, es posible asumir que el modelo de microsimulación representa con suficiente fidelidad el tráfico que se pretende gestionar. A continuación, se caracterizan las incidencias ficticias que se usarán en el modelo, y se procede a implementar en el modelo un algoritmo que sea capaz de detectar esas incidencias.
4. **Análisis del tráfico en la incidencia y desarrollo de estrategias alternativas:** Sirviéndose de un algoritmo de detección de incidencias funcional, se estudian las posibilidades de redirección del tráfico en cada incidencia y se simulan una serie de estrategias para determinar cuál de las estrategias es la que minimiza el

coste de la red de forma más eficaz para cada una de las dos incidencias contempladas en el estudio.

5. **Conclusión:** Una vez realizados los pasos anteriores, se elabora una conclusión sobre las pautas a seguir y los aspectos a tener en cuenta en el sistema de gestión del tráfico ante incidencias que se propone en el estudio.

6 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: CONSTRUCCIÓN DE LA RED Y MODELIZACIÓN DE LA DEMANDA.

En este apartado se describe la red que se ha utilizado en el modelo y los pasos que se han seguido para modelizar la demanda, así como los resultados correspondientes.

La oferta de transporte. Red modelizada.

La zona geográfica que ha sido modelizada se muestra en la siguiente imagen de Openstreetmaps. En naranja oscuro se aprecian las autovías y autopistas, en naranja claro las nacionales y en amarillo las autonómicas:

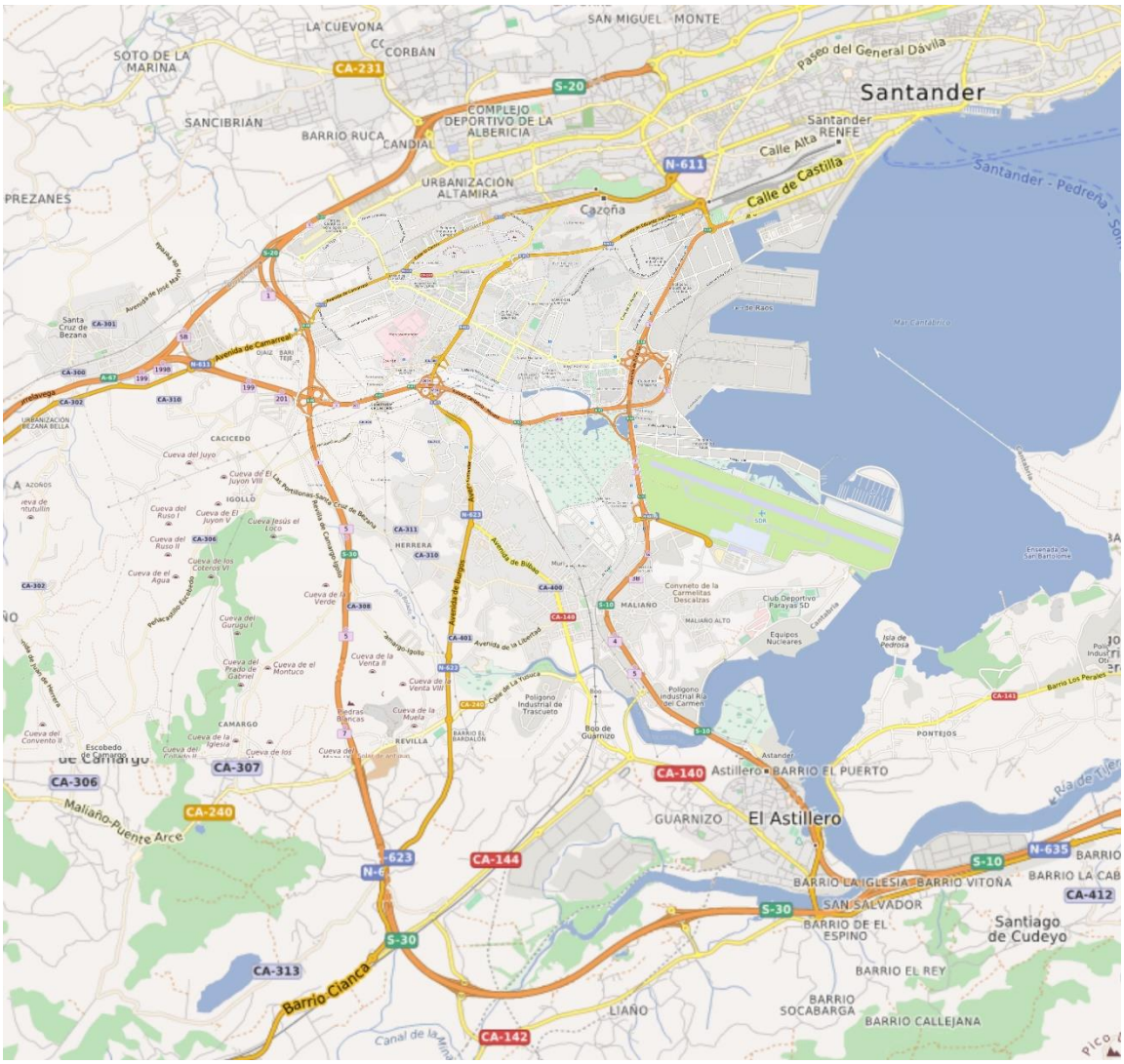


Figura 18: Zona geográfica que contiene los viales objeto de estudio. Fuente: openstreetmaps.

La red objeto de estudio comprende los accesos principales a la ciudad de Santander (A-67, S-10, S-20 y S-30) así como algunas carreteras nacionales y autonómicas que sirven de apoyo a las autovías y autopistas principales. Para la modelización de la demanda, la red cuenta con una zonificación materializada en una matriz de 26 centroides que represntan las siguientes zonas de influencia (de Norte a Sur y de Este a Oeste):

1. Centro Santander.
2. Monte.
3. Santander-1 (entrada)
4. San Román.
5. Liencres.
6. Aeropuerto – Raos.
7. Corte Inglés.
8. Muriedas.
9. Peñacastillo
10. Bezana.
11. Torrelavega.
12. Maliaño.
13. Somo – Pedreña.
14. Pontejos.
15. Astillero – Marismas.
16. Astillero.
17. Revilla.
18. Camargo.
19. Escobedo de Camargo.
20. Bilbao.
21. San Salvador.
22. Peña Cabarga.
23. Santiago de Cudeyo.
24. Liaño.
25. Sarón.
26. N-623.

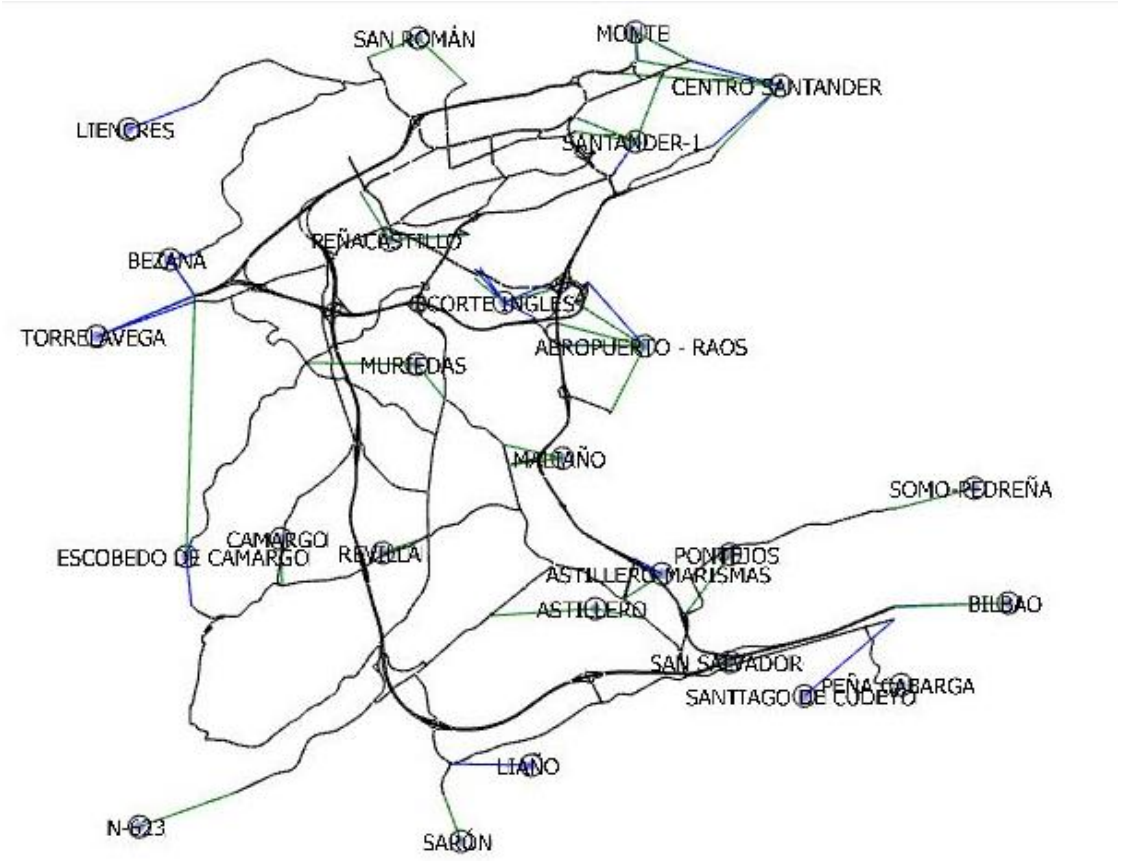


Figura 19: Red de Aimsun empleada en el modelo con los nombres y localización de los 26 centroides.

La red viaria que se ha tenido en cuenta para el modelo tiene la siguiente composición jerárquica:

- Autopista:
  - A-67.
- Autovías:
  - S-10.
  - S-20.
  - S-30.
- Nacionales:
  - N-611.
  - N-623.
  - N-636.
  - N-635.
- Autonómicas:
  - CA-231
  - CA-130

  - CA-301
  - CA-310
  - CA-306
  - CA-140
  - CA-240
  - CA-307
  - CA-308
  - CA-144
  - CA-142
  - CA-143
  - CA-141
  - CA-412
- Algunas vías urbanas, como por ejemplo:
  - Avenida de Bartolomé Darnís.
  - Avenida de Severo-Ochoa.
  - Avenida de Albert Einstein.
  - Avenida de Los Castros.
  - Avenida de La Constitución.
  - Avenida de José Ortega y Gasset.
  - Algunas calles que sirven de enlace corto.
  - Etc.

Las incorporaciones se han tenido en cuenta, y las intersecciones son reguladas con stop, ceda el paso o reglas de rotondas.

La demanda de transporte. Calibración macroscópica.

Aunque se trate de un modelo de simulación microscópica, se emplea la simulación macroscópica para concretar la demanda de transporte (total, sin distinguir entre vehículos pesados y ligeros) que responde a las condiciones que se pretende reproducir.

Para ello, se utiliza el propio software TSS aimsun para ajustar una matriz preexistente pero no válida, con el fin de modificarla de tal forma que una simulación macroscópica de valores de flujo aceptables. Para ello, es necesario contar con datos de aforos representativos del período de simulación objetivo en suficientes puntos de la red.

Estos datos se obtienen del Mapa de Tráfico del Ministerio de Fomento. Se identifican hasta 25 puntos con aforos aprovechables. Cada uno de estos 25 puntos aporta una pareja de datos de aforo, uno por cada sentido, lo que da lugar a 50 datos de aforos en 25 pares de estaciones. En la siguiente figura se muestra el aspecto del mapa de tráfico de la zona. En ella pueden apreciarse los puntos en los que se cuenta con información de aforo.

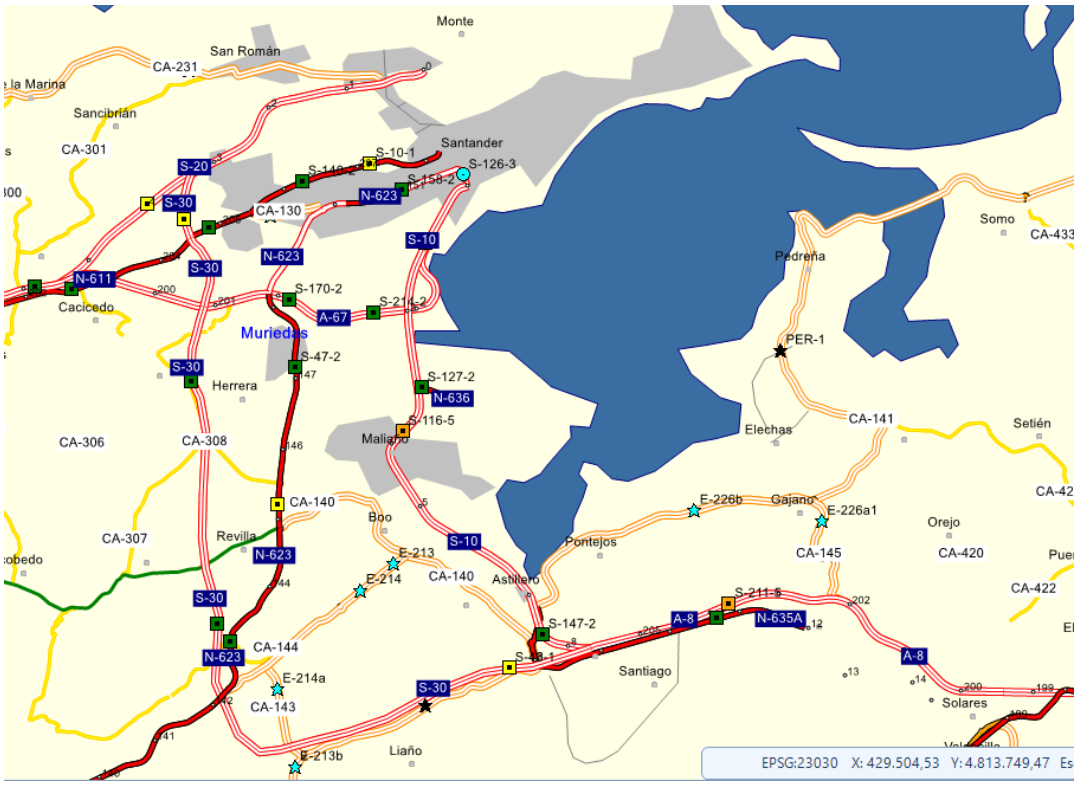


Figura 20: Captura del Mapa de Tráfico del que se han extraído los datos de aforos.

El escenario que se ha escogido para la simulación es un día laboral medio a las 8:00 a.m., con una hora de duración, lo que se corresponde con la hora punta de un día laboral en invierno (8:00 – 9:00 a.m.). Se ha escogido este escenario por considerarse el de mayor relevancia económica y de mayor solicitación de tráfico en la red, lo que lo convierte en un escenario crítico para una incidencia importante y un escenario ideal para el diseño de las estrategias de reenrutamiento. Por ello, se ha procurado que los datos de aforo que se han introducido al modelo sean representativos del tráfico que puede circular un día laboral medio durante ese intervalo de tiempo.

El dato de tráfico se ha extraído de la siguiente manera: tras analizar la distribución horaria del tráfico en el día laboral medio en las estaciones principales (primarias) del mapa de tráfico, se ha concluido que el volumen de tráfico circulante entre las 8:00 a.m. y las 9:00 a.m. de un día laboral puede obtenerse como un 8% de la Intensidad Media Diaria del día medio de la semana media (dato disponible para todas las estaciones), y que este volumen representa el tráfico circulante en los dos sentidos, repartiéndose en un 60% y un 40% en el sentido de entrada a Santander y en el sentido de salida de Santander respectivamente. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de uno de los informes del mapa de tráfico de los que se ha extraído esta hipótesis:

GOBIERNO DE ESPAÑA — MINISTERIO DE FOMENTO — SECRETARÍA GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS — DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS

INTENSIDADES HORARIAS MEDIAS EN LAS 24 HORAS DEL DIA MEDIO 2014

Estacion: S-165-1 Tipo de Datos: Validados Mensual
Dia: Laborables

Provincia: CANTABRIA Tipo: PRIMARIA Población: ADARZO
Carretera: S-20 PK: 3,98 Núm. Calzadas: 2 Conv. Carriles: 2+2

Calzada: 1 — Porcentajes Horarios

Carril	Tipo	L0	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10	L11	L12	L13	L14	L15	L16	L17	L18	L19	L20	L21	L22	L23	I.M.D.
1	Ligeros	1,05	0,43	0,21	0,12	0,16	0,46	1,07	4,19	6,07	5,24	4,84	5,05	5,49	6,62	7,65	6,88	6,00	6,40	6,97	7,10	7,15	5,49	3,58	1,77	10.585
1	Pesados	0,37	0,37	0,00	0,00	0,00	0,37	1,49	3,36	8,58	10,07	8,58	8,58	7,46	7,46	6,34	6,72	5,97	6,72	6,72	4,10	2,99	1,49	1,12	1,12	268
1	Total	1,03	0,43	0,21	0,12	0,17	0,46	1,08	4,17	6,12	5,37	4,93	5,14	5,54	6,64	7,61	6,87	6,00	6,41	6,96	7,03	7,05	5,38	3,52	1,76	10.866
2	Ligeros	0,26	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03	0,18	3,75	7,76	4,83	3,75	3,93	4,72	6,97	9,55	7,65	5,60	6,71	8,26	8,64	9,23	5,19	2,29	0,64	3.413
2	Pesados	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	20,00	0,00	0,00	20,00	20,00	20,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5
2	Total	0,26	0,06	0,03	0,00	0,00	0,03	0,18	3,76	7,73	4,84	3,76	3,94	4,73	6,97	9,57	7,64	5,57	6,71	8,26	8,63	9,22	5,19	2,28	0,64	3.428
Todos	Ligeros	0,86	0,34	0,16	0,09	0,13	0,36	0,86	4,08	6,47	5,14	4,57	4,78	5,30	6,71	8,12	7,07	5,90	6,47	7,28	7,48	7,66	5,42	3,27	1,50	14.010
Todos	Pesados	0,36	0,36	0,00	0,00	0,00	0,36	1,42	3,20	8,19	9,96	8,54	8,54	7,47	7,47	6,41	6,76	5,69	7,12	7,12	4,27	3,20	1,42	1,07	1,07	281
Todos	Total	0,85	0,34	0,17	0,10	0,13	0,36	0,87	4,07	6,51	5,24	4,65	4,85	5,34	6,72	8,08	7,06	5,89	6,48	7,27	7,41	7,57	5,34	3,22	1,49	14.301

Figura 21: Informe de tráfico de la distribución horaria del día laboral medio en la estación S-165-1.

Aplicando la anterior hipótesis, se obtienen 50 (25 pares, dos datos por sentido) datos de aforos que se asocian a detectores desplegados en el modelo y con los que el software modificará la matriz Origen – Destino de tal manera que la asignación macroscópica resulte en un flujo coherente con los datos de dichos detectores. En la siguiente figura se puede apreciar la distribución de los (pares de) detectores en la red del modelo:

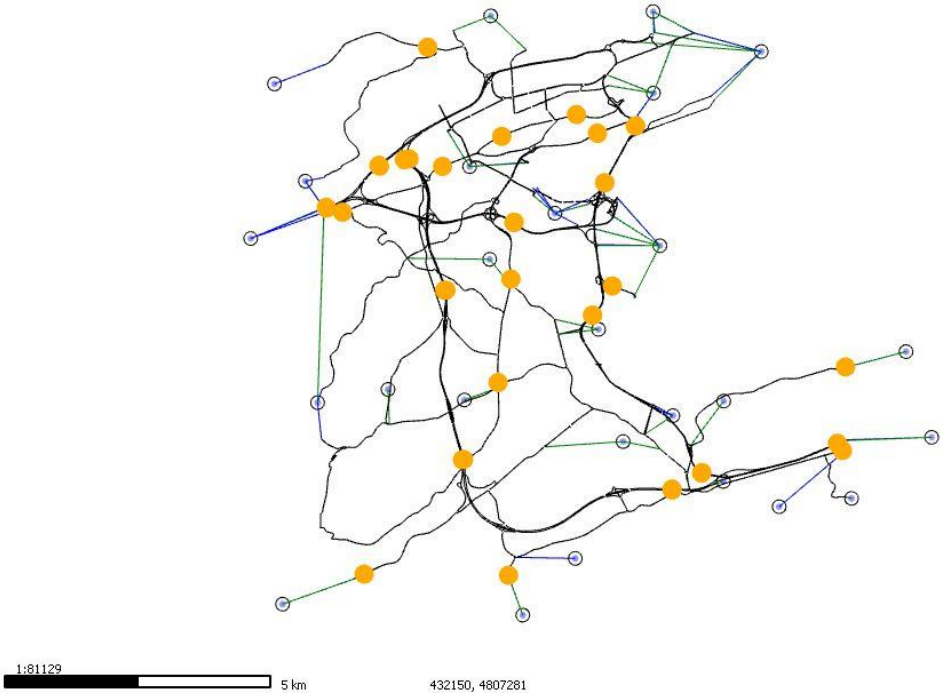


Figura 22: Ubicación de los detectores empleados como aforo en la red.

La relación de los detectores con sus correspondientes localizaciones y valores de aforo es la siguiente:

Tabla 3: Relación de estaciones, ubicación y valores de los aforos.

Estación	Número	Calzada	IMD media (veh/día)	Reparto por sentido	Coeficiente hora punta	Aforo (veh/día)
S-10-1 E	1	N-611	11294	0,6	0,08	542
S-10-1 S	2	N-611	11294	0,4	0,08	361
S-165-1 E	3	S-20	27117	0,6	0,08	1302
S-165-1 S	4	S-20	27117	0,4	0,08	868
S-127-2 E	5	N-636	6400	0,6	0,08	307
S-127-2 S	6	N-636	6400	0,4	0,08	205
S-22-2 E	7	S-10	90388	0,6	0,08	4339
S-22-2 S	8	S-10	90388	0,4	0,08	2892
S-170-2 E	9	A-67	52019	0,6	0,08	2497
S-170-2 S	10	A-67	52019	0,4	0,08	1665
PER-10 E	11	CA-231	12829	0,6	0,08	616
PER-10 S	12	CA-231	12829	0,4	0,08	411
S-40-1 E	13	S-30	20107	0,6	0,08	965
S-40-1 S	14	S-30	20107	0,4	0,08	643
S-46-2 E	15	N-611	9355	0,6	0,08	449
S-46-2 S	16	N-611	9355	0,4	0,08	299
S-140-2 E	17	N-611	6324	0,6	0,08	304
S-140-2 S	18	N-611	6324	0,4	0,08	202
S-158-2 E	19	N-623	17873	0,6	0,08	858
S-158-2 S	20	N-623	17873	0,4	0,08	572
S-126-3 E	21	N-623a	28723	0,6	0,08	1379
S-126-3 S	22	N-623a	28723	0,4	0,08	919
S-330-2 E	23	A-67	71357	0,6	0,08	3425
S-330-2 S	24	A-67	71357	0,4	0,08	2283
S-333-2 E	25	N-611	14060	0,6	0,08	675
S-333-2 S	26	N-611	14060	0,4	0,08	450
S-47-2 E	27	N-623	16316	0,6	0,08	783
S-47-2 S	28	N-623	16316	0,4	0,08	522
S-41-2 E	29	S-30	32197	0,6	0,08	1545
S-41-2 S	30	S-30	32197	0,4	0,08	1030
S-116-5 E	31	S-10	67047	0,6	0,08	3218
S-116-5 S	32	S-10	67047	0,4	0,08	2146
S-12-1 E	33	N-623	11256	0,6	0,08	540
S-12-1 S	34	N-623	11256	0,4	0,08	360
S-42-2 E	35	S-30	24655	0,6	0,08	1183
S-42-2 S	36	S-30	24655	0,4	0,08	789

S-142-2 E	37	N-623	7822	0,6	0,08	375
S-142-2 S	38	N-623	7822	0,4	0,08	250
PER-3 E	39	CA-142	13484	0,6	0,08	647
PER-3 S	40	CA-142	13484	0,4	0,08	431
S-147-2 E	41	S-10	34955	0,6	0,08	1678
S-147-2 S	42	S-10	34955	0,4	0,08	1119
S-43-1 E	43	S-30	17370	0,6	0,08	834
S-43-1 S	44	S-30	17370	0,4	0,08	556
PER-1 E	45	CA-141	8133	0,6	0,08	390
PER-1 S	46	CA-141	8133	0,4	0,08	260
S-20-2 E	47	N-635	5658	0,6	0,08	272
S-20-2 S	48	N-635	5658	0,4	0,08	181
S-211-5 E	49	S-10	50242	0,6	0,08	2412
S-211-5 S	50	S-10	50242	0,4	0,08	1608

El resultado de la validación tras el ajuste macroscópico es el siguiente:

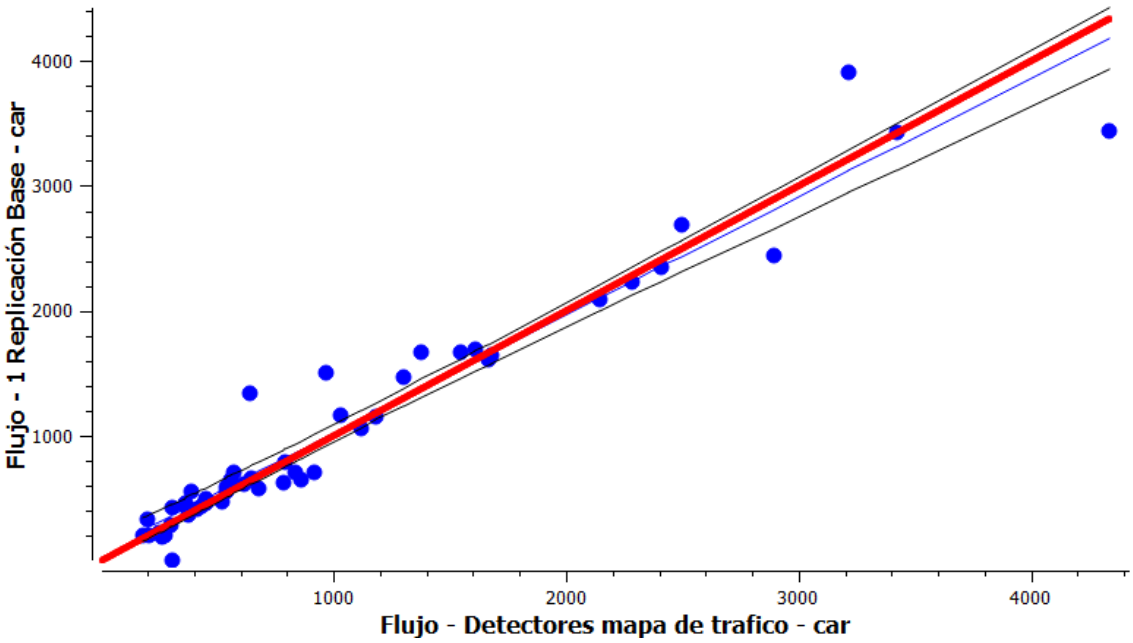


Figura 23: Validación con los datos anteriores tras el ajuste de la demanda y la asignación macroscópica.

La recta de regresión sigue la ecuación $y = 75.9641 + 0.944974x$ y tiene un $R^2 = 0.936$. Se comprueba que no se producen distribuciones problemáticas de tráfico con la asignación, por lo que se asume que el modelo está validado macroscópicamente y se acepta la matriz O-D resultante como válida para la demanda del escenario microscópico.

La calibración microscópica

Aunque la demanda haya dado resultados satisfactorios con una asignación macroscópica, es necesario que el modelo funcione bien con una asignación estocástica de tipo

microscópico. Las diferencias en los resultados de estas dos asignaciones se deben a dos tipos de causas:

1. El modelo microscópico tiene en cuenta elementos delicados que no tiene en cuenta el modelo macro, por ejemplo: interacciones entre vehículos, intersecciones que pueden ser colapsadas, stop & go… Estos elementos pueden dar lugar a caídas de la capacidad que el modelo macro no puede representar, limitando el flujo que pasa por la red aunque la demanda sea correcta, provocando la aparición de colas virtuales.
2. El modelo macroscópico y el microscópico utilizan sistemas de asignación diferentes. El modelo macroscópico emplea una versión simplificada de los costes de los arcos y una asignación Frank & Wolfe, que tiene como resultado una elección de rutas que se corresponde más con las rutas más utilizadas por los usuarios. En cambio en el modelo microscópico se usa una asignación estocástica que toma en cuenta contingencias de la red lo que puede dar lugar a elecciones menos frecuentes.

Tras la asignación, el modelo no presenta problemas de colas virtuales. El mejor resultado se obtiene para un escenario en el que se establece que el 50% de los vehículos utilice la asignación estocástica y el 50% restante siga las rutas guardadas en una asignación de caminos de la asignación macroscópica. De esta forma se refleja la existencia de una tendencia de parte de los conductores a optar por rutas típicas independientemente de las condiciones del tráfico observadas en la simulación microscópica. Tras observarse un resultado satisfactorio, se realiza la misma asignación pero dividiendo la matriz O-D en una matriz de ligeros y otra de pesados, con un reparto 94-6, respectivamente. Este valor se ha extraído siguiendo el mismo análisis que en el caso de los aforos, a través del reparto observado en las estaciones de la zona. En la siguiente figura se muestra la validación obtenida de realizar la asignación microscópica de la demanda que tiene en cuenta el reparto de pesados y ligeros:

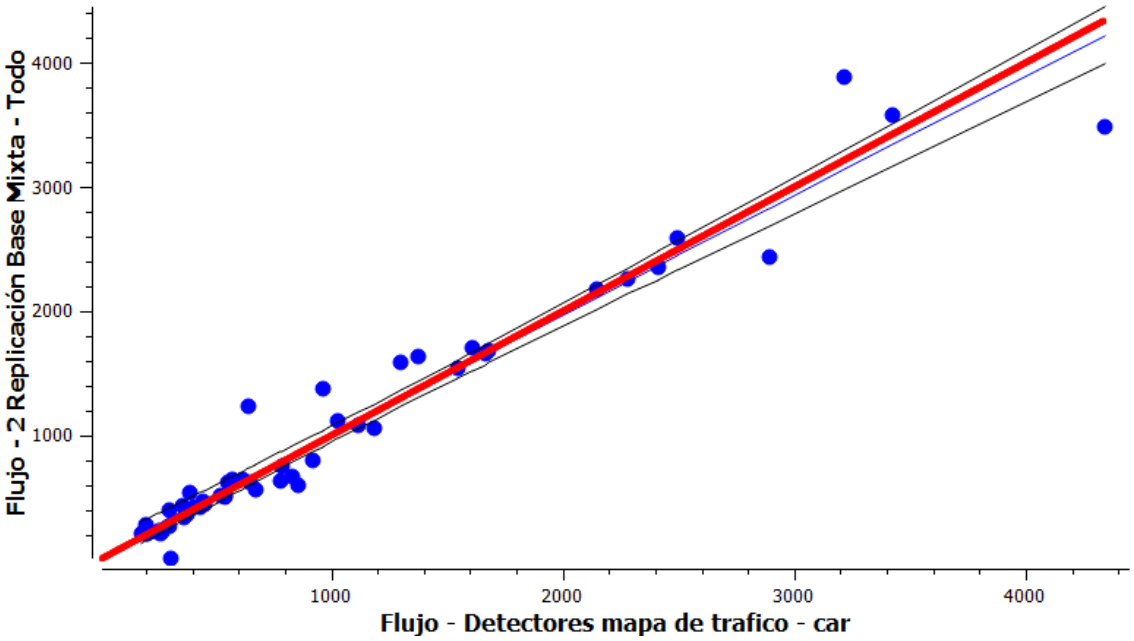


Figura 24: Validación de la asignación microscópica con la demanda repartida entre pesados y ligeros.

La recta de regresión sigue la ecuación $y = 46.5046 + 0.961196x$ y tiene un $R^2 = 0.945$. Se comprueba que el tráfico presenta una distribución razonable, especialmente en las zonas principales de la red. En este momento el modelo se considera calibrado y está listo para aplicar las incidencias, el algoritmo de detección y la búsqueda de una estrategia de reenrutamiento eficaz para cada incidencia.

7 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: INCIDENCIAS SIMULADAS

Incidencias del modelo

A continuación es necesario establecer unas incidencias "teóricas" en diferentes escenarios del modelo. Estas incidencias serán las causantes de los efectos adversos en el tráfico de la red modelada, y las estrategias de reenrutamiento deberán diseñarse para minimizar dichos efectos en el tráfico. En este estudio se han considerado dos tipos de incidencias que tendrán que gestionarse, y para las que se diseña el sistema de gestión. Estas incidencias habrán de ser características de la red, ya que la estrategia no podrá ser extrapolable a una incidencia muy diferente.

Incidencia PCTCAN

La primera incidencia, llamada "Incidencia PCTCAN" consiste en una eventualidad (un accidente, por ejemplo) ocurrida en la S-20 en las proximidades del Parque Científico y Tecnológico de Cantabria (PCTCAN), un tramo con un tráfico considerable en el que hay una transición con el cierre de un carril inmediatamente después de un ramal de entrada a la autovía. Esto reúne las condiciones para que haya problemas con relativa frecuencia por coches que se incorporan sin espacio por el cierre del carril exterior. En al siguiente figura se aprecia la ubicación geográfica de la incidencia.

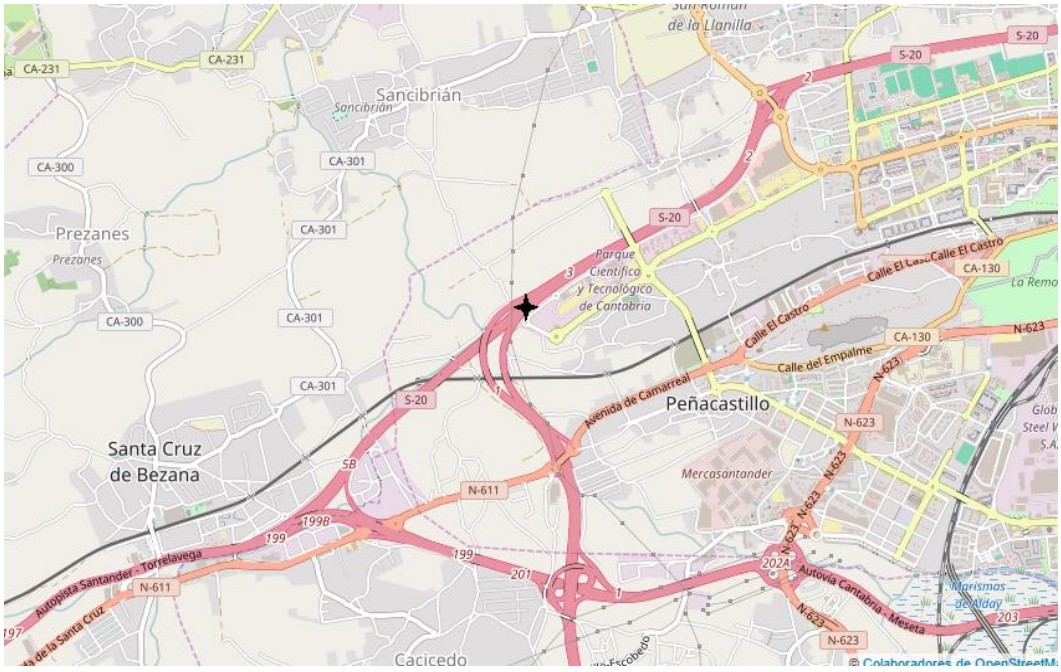


Figura 25: Ubicación geográfica de la incidencia PCTCAN marcada con una estrella negra.

Las características de la incidencia son las siguientes:

- Dos carriles exteriores bloqueados.
- Longitud de la incidencia: 60 metros.
- Sentido: entrada a Santander.
- Duración de la incidencia: de las 08:03:00 a las 08:38:00. (35 minutos)
- Reducción de la velocidad en el carril libre a 70 km/h.
- Reducción de la velocidad en la calzada opuesta a 90 km/h.

En la siguiente figura se aprecia la implementación de estas características en el modelo de microsimulación:

Figura 26: Modelado de la incidencia PCTCAN.

La duración del evento se debe a que el evento debe ser suficientemente importante para ser representativo de una avería o accidente real, pero aún así estar contenido en la hora punta de entrada a Santander. Con 35 minutos se incluye el tiempo de llegada de equipos de emergencia y de limpieza, y se contienen 3 minutos de simulación previos (más calentamiento) y 22 minutos posteriores a la liberación del tramo ocupado. En el tramo bloqueado de dos carriles de 60 metros no se incluye sólo el problema, sino también los equipos que están presentes en la calzada y que deben ser protegidos. La reducción de la velocidad en la sección se debe al efecto *rubbernecking.* El *rubbernecking* es la modificación del comportamiento de un conductor en los carriles adyacentes a una incidencia debido a que cuando un conductor pasa cerca de un punto en el que una incidencia ha tenido lugar, tiende a reducir la velocidad, bien por razones de seguridad, bien

para mirar qué ha ocurrido; lo cual crea una reducción de capacidad adicional a la causada por la incidencia (Portilla et al, 2009).

Incidencia Corte Inglés

La segunda incidencia modelizada, llamada "Incidencia Corte Inglés", es una incidencia situada en la S-10 al pie del enlace junto al Corte Inglés, en una zona situada señalada como Punto Negro (o tramo de concentración de accidentes). La ubicación puede apreciarse en la siguiente figura:

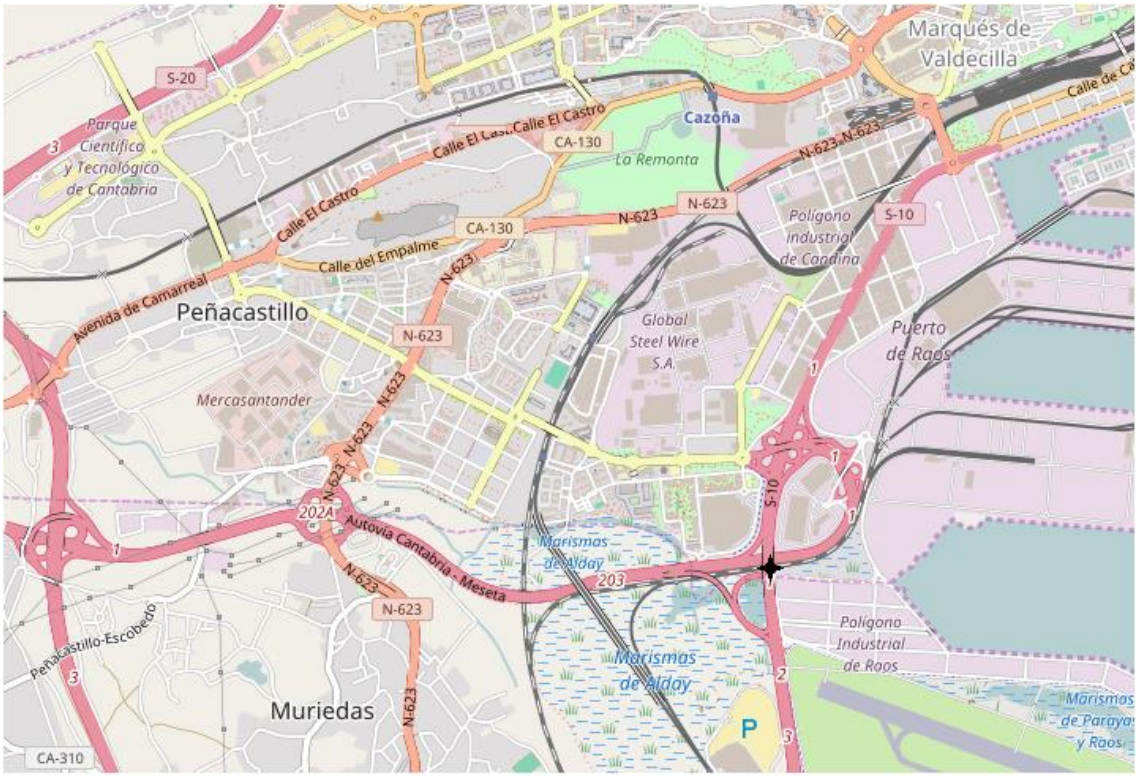


Figura 27: Ubicación geográfica de la incidencia Corte Inglés marcada con una estrella negra.

Las características de la incidencia son las siguientes:

- Dos carriles interiores bloqueados.
- Longitud de la incidencia: 60 metros.
- Sentido: entrada a Santander.
- Duración de la incidencia: de las 08:03:00 a las 08:38:00. (35 minutos)
- Reducción de la velocidad en el carril libre a 70 km/h.
- Reducción de la velocidad en la calzada opuesta a 90 km/h.

En la siguiente figura se aprecia la implementación de estas características en el modelo de microsimulación:

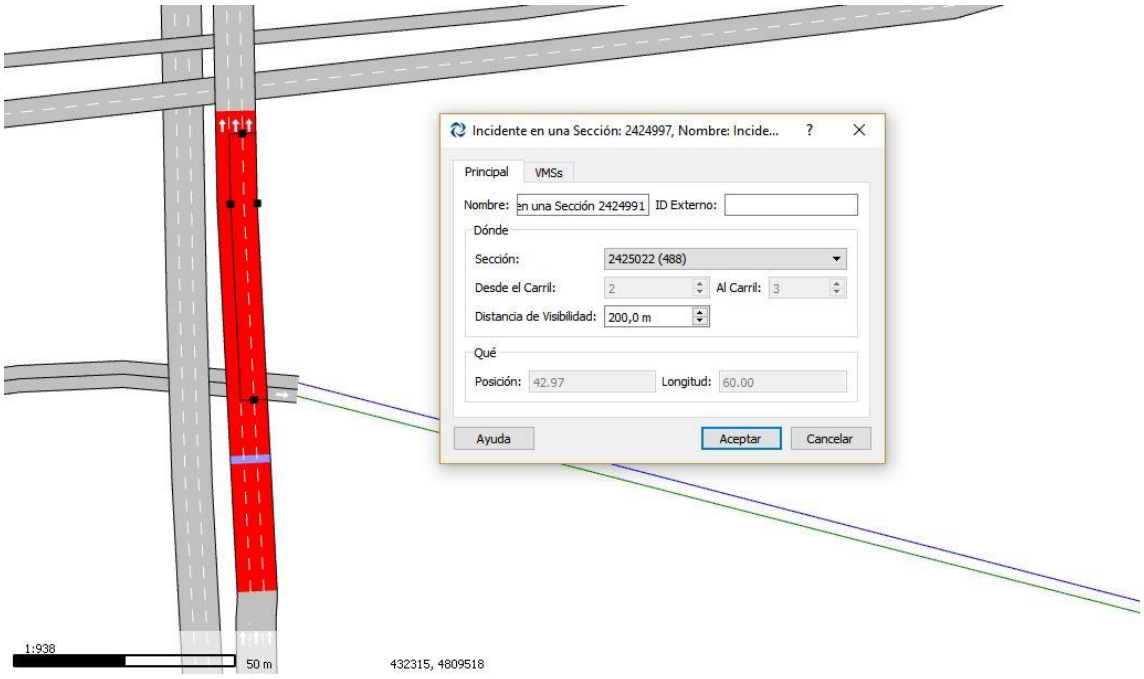


Figura 28: Modelado de la incidencia Corte Inglés.

La duración, longitud y número de carriles son análogas a la anterior incidencia. La diferencia es que en este caso la incidencia bloquea el carril derecho y el adyacente, dejando el izquierdo libre.

8 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: PROCESO DE DISEÑO DE LAS ESTRATEGIAS DE REENRUTAMIENTO

Proceso general

El proceso de diseño de las estrategias de reenrutamiento ha seguido los siguientes pasos:

1. Caracterización del tráfico en la situación sin incidencias. Caracterización de los valores normales de ocupación en los detectores para el algoritmo de detección.
2. Caracterización del flujo en la zona del accidente. Caracterización de los valores de ocupación inducidos por la incidencia en los detectores para el algoritmo de detección.
3. Caracterización del escenario *Do Nothing*, con incidencia pero sin gestión.
4. Análisis pormenorizado de las rutas que siguen los vehículos que pasan por la zona de la incidencia.
5. Aplicación de forma progresiva de distintas decisiones que afecten a los vehículos en base al análisis del punto anterior. Cada grupo de nuevas decisiones constituye una nueva estrategia a simular en la que se tendrá en cuenta:
    - Capacidad de la estrategia para mitigar la congestión en la zona de la incidencia.
    - Capacidad de la estrategia para satisfacer la demanda durante la hora punta. Esto se analiza observando los valores de cola virtual y de flujo en los resultados de la simulación, que tienen que ser del orden (o más favorables) de los de la simulación sin incidencias. Para que sirva de ejemplo, en la situación "no hacer nada" no se consigue satisfacer la demanda, obteniéndose valores de cola virtual y flujo inaceptables.
    - La estrategia no colapsa o congestiona gravemente otras zonas de la red de menor capacidad al desviar el tráfico.
    - La estrategia ofrece un coste de la red menor que las alternativas, aproximando el estado de la red al de la situación sin incidencias.

En realidad, los puntos anteriores están interrelacionados. Ninguna estrategia logrará satisfacer la demanda si no mitiga la congestión en el área de la incidencia o si congestiona otros puntos de la red. El último punto sirve para comparar estrategias que hayan satisfecho las condiciones anteriores, y determinar cuál entre varias estrategias aceptables es la mejor. Cada nueva estrategia alternativa se compara con las anteriores con el fin de determinar si su aportación ha sido positiva o negativa y por qué.

Finalmente, se han obtenido dos salidas de datos en las que se comparan los resultados de las estrategias elegidas con los escenarios sin incidencias y *do nothing*: un mapa de nivel de servicio basado en densidad obtenido en el último segundo con incidencia (8:38:00) con la escala del HCM, y unos diagramas espacio-tiempo de densidad y de velocidad. Los diagramas espacio tiempo son extraídos de dos grupos de detectores espaciados unos 250 metros entre ellos; un grupo va desde el comienzo de la A-67 hasta el dA (pasada la incidencia PCTCAN en la S-20) y el otro grupo va desde el comienzo de la S-10 al dC (pasada la incidencia Corte Inglés en la S-10), como puede apreciarse en la siguiente figura:

Figura 29: Grupos de detectores para sacar los diagramas espacio – tiempo.

Algoritmo de detección

Como desencadenante de la estrategia de gestión, se emplea una versión simplificada del algoritmo California de detección de incidencias. Para ello, se dispone de una pareja de detectores separados 150 m que comprenden la zona en la que ocurrirá la incidencia.

Aimsun no permite crear un desencadenante con una variable resultado de la comparación de la diferencia entre los valores de ocupación con unos determinados umbrales (algoritmo California), pero permite la comparación de la ocupación de un detector con un umbral y la del otro con otro umbral. Para el estudio de aplicación, esa versión es suficiente para programar un algoritmo que desencadene la gestión del tráfico y la desactive cuando las condiciones de tráfico en la zona de incidencia se corresponden con una situación normal.

El algoritmo California se fundamenta en que una incidencia que produzca congestión producirá un ascenso en el nivel de ocupación aguas arriba y una caída en la ocupación aguas abajo, como resultado del cuello de botella. Por tanto el algoritmo se programa para desencadenar la gestión cuando el detector de aguas arriba tenga una ocupación superior a un valor determinado y simultáneamente el detector de aguas abajo presente una ocupación inferior a otro umbral determinado.

Escenario sin incidencias

El escenario sin incidencias sirve de referencia para las diferentes estrategias en los dos casos. Representa su umbral superior de aceptación, del mismo modo que el escenario *Do Nothing* representa el umbral inferior de aceptación.

Los parámetros que se tienen en cuenta para la comparación y los valores del escenario sin incidencias se presentan a continuación.

Tabla 4: Series temporales para el escenario sin incidencias

Sin incidencias		
Serie Temporal	Unidades	Valor
Cola Media - Todo	veh	82,8600
Cola Virtual Máxima - Todo	veh	272,0000
Cola Virtual Media - Todo	veh	144,8500
Densidad - Todo	veh/km	6,28
Flujo - Todo	veh/h	25775,0000
Giros Perdidos - Todo		310,0000
Número Total de Paradas - Todo		3293,58
Tiempo de Demora - Todo	seg/km	9,22
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Todo	sec	10,68
Tiempo de Parada - Todo	seg/km	1,82
Tiempo de Viaje - Todo	seg/km	51,63
Tiempo Total de Viaje - Todo	h	2792,11

9 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: DISEÑO DE LA ESTRATEGIA PCTCAN

Detección

El detector aguas arriba de la incidencia se llama dA, y el detector aguas abajo se llama dB. En la siguiente figura se aprecia de forma gráfica:

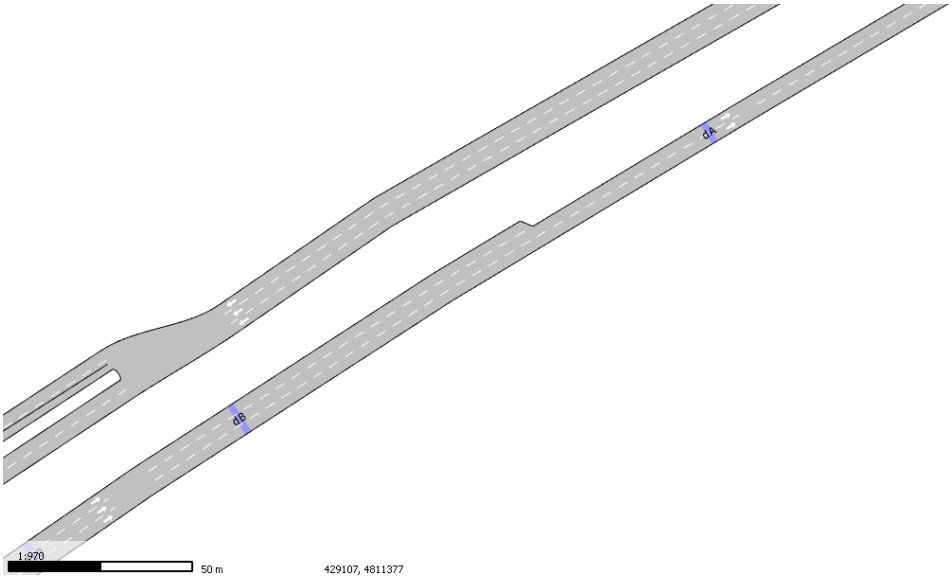


Figura 30: Detectores para detección de la incidencia PCTCAN.

Los patrones de ocupación normales son los siguientes:

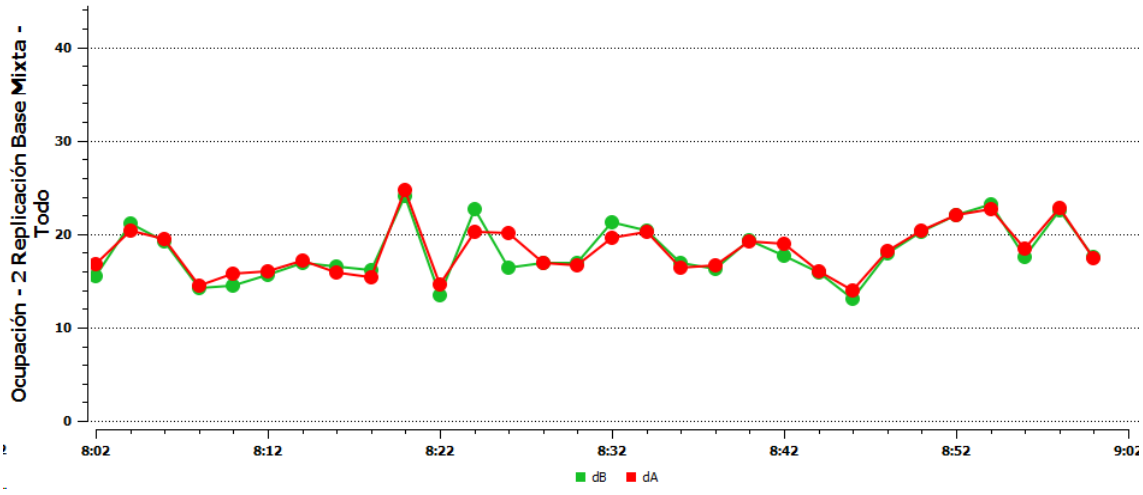


Figura 31: Valores normales de ocupación en dA y dB.

Tabla 5:Valores de ocupación sin incidencia de los detectores PCTCAN

Hora	dB	dA	Diferencia
8:02:00	15,51	16,75	1,25
8:04:00	21,08	20,32	-0,76
8:06:00	19,23	19,43	0,19
8:08:00	14,21	14,50	0,30
8:10:00	14,52	15,76	1,24
8:12:00	15,58	15,98	0,39
8:14:00	16,94	17,10	0,16
8:16:00	16,49	15,89	-0,61
8:18:00	16,09	15,30	-0,79
8:20:00	24,01	24,75	0,74
8:22:00	13,47	14,66	1,18
8:24:00	22,71	20,26	-2,45
8:26:00	16,39	20,10	3,72
8:28:00	16,87	16,92	0,06
8:30:00	16,88	16,69	-0,19
8:32:00	21,30	19,65	-1,65
8:34:00	20,30	20,18	-0,12
8:36:00	16,84	16,43	-0,41
8:38:00	16,33	16,60	0,28
8:40:00	19,29	19,14	-0,15
8:42:00	17,62	18,98	1,36
8:44:00	15,85	16,05	0,20
8:46:00	13,10	13,95	0,85
8:48:00	17,96	18,19	0,23
8:50:00	20,22	20,34	0,12
8:52:00	21,97	22,01	0,03
8:54:00	23,21	22,68	-0,53
8:56:00	17,59	18,46	0,87
8:58:00	22,57	22,85	0,28
9:00:00	17,50	17,38	-0,13

Como vemos en la anterior figura y tabla, los valores de ocupación normales oscilan entre 14 y 22, con una media en torno a 17, y siempre muy similares en ambos detectores. Se emplea esta información para calibrar el ADI, de forma que detecte la incidencia lo antes posible (en 2 minutos como máximo) y desactive la estrategia en cuanto deje de ser necesaria.

La activación y desactivación de la gestión (umbrales del algoritmo) se va optimizando según se simulan escenarios con diferentes estrategias. Los primeros valores con los que se testea son:

$$\text{Activación: PCTCAN ON } \begin{cases} dB > 30 \\ dA < 25 \end{cases}$$

$$\text{Desactivación: PCTCAN OFF } \begin{cases} dB < 30 \\ dA > 20 \end{cases}$$

No obstante, estos valores serán corregidos hasta los obtenidos en la solución definitiva.

Escenario *Do Nothing*

El escenario *Do Nothing* plantea el umbral inferior de aceptación de cualquier estrategia. Ninguna estrategia es aceptable si no obtiene un resultado significativamente mejor a este escenario. En la siguiente imagen se aprecia una captura del estado de la red en este escenario, concretamente segundos después de la liberación de la incidencia a las 08:38:00. Como vemos, la S-20 y el ramal de acceso a la autovía están colapsados.

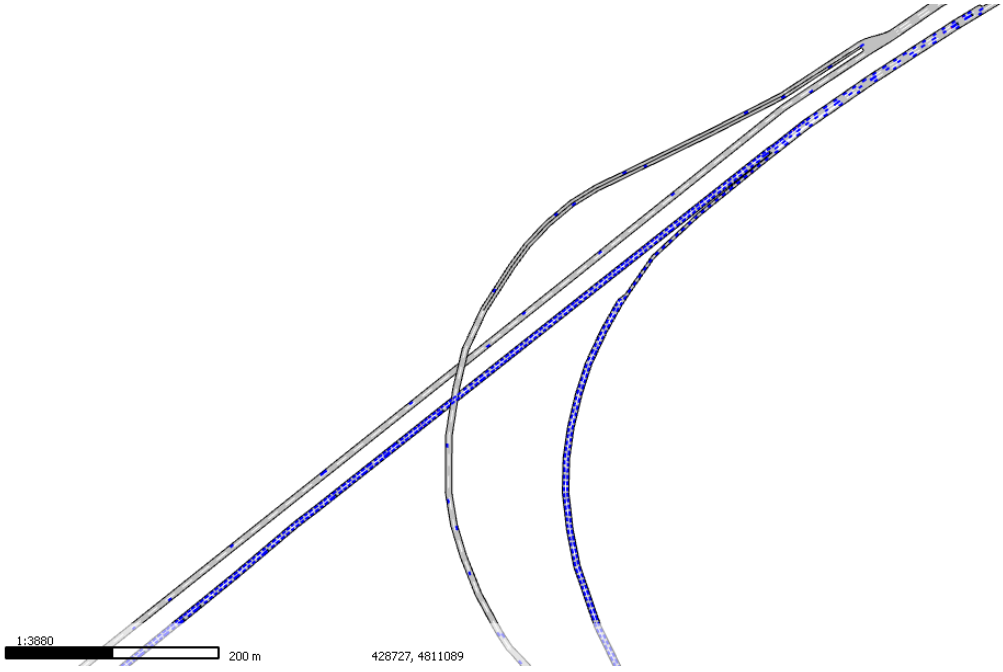


Figura 32: Ejemplo del estado de la S-20 en el escenario Do Nothing en el momento de liberación de la incidencia.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución de la ocupación en los detectores dA y dB a lo largo del período de simulación. Debido a la congestión elevada, la pérdida de capacidad y a los fenómenos de stop & go, la red no logra recuperarse (apenas se aprecia una cierta histéresis tras el minuto 8:38) Una parte importante de la demanda de transporte no se satisface durante la simulación.

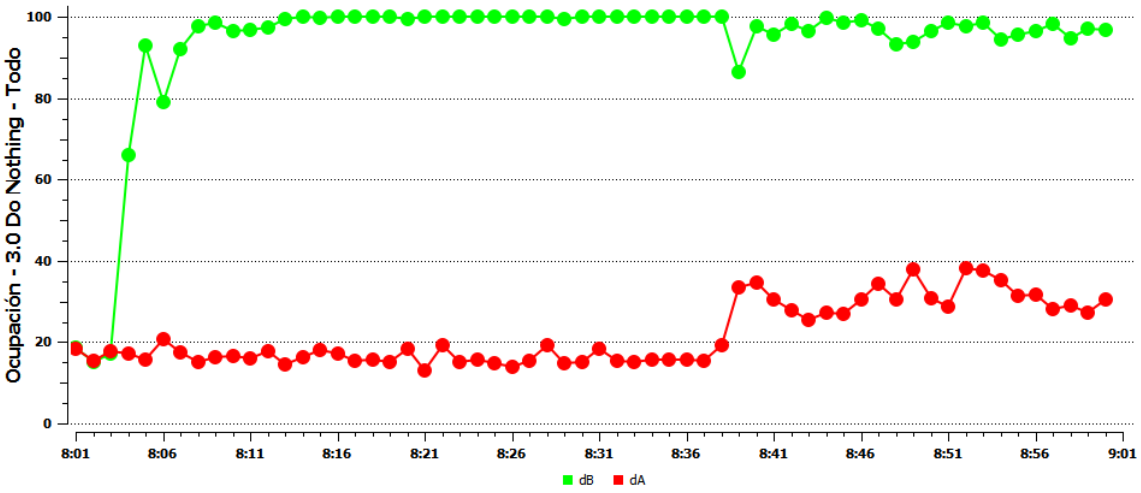


Figura 33: Evolución de la ocupación en los detectores dA y dB en el escenario Do Nothing con la incidencia PCTCAN.

Los resultados de las series temporales de la simulación son los siguientes. La tercera columna expresa la diferencia con el escenario sin incidencias:

Tabla 6: Resultados del escenario Do Nothing con incidencia PCTCAN

Do Nothing		
Serie Temporal	Valor	Diferencia
Cola Media - Todo	388,05	305,1900
Cola Virtual Máxima - Todo	169	-103,0000
Cola Virtual Media - Todo	73,26	-71,5900
Densidad - Todo	7,1	0,8200
Flujo - Todo	25351	-424,0000
Giros Perdidos - Todo	359	49,0000
Número Total de Paradas - Todo	3413,36	119,7800
Tiempo de Demora - Todo	14,11	4,8900
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Todo	6,11	-4,5700
Tiempo de Parada - Todo	6,03	4,2100
Tiempo de Viaje - Todo	56,56	4,9300
Tiempo Total de Viaje - Todo	3057,15	265,0400

El resultado de “Flujo” confirma la hipótesis de que la demanda no queda satisfecha.

Búsqueda de la estrategia óptima

La búsqueda de la estrategia óptima para el escenario PCTCAN empieza por consultar las estadísticas de caminos de los coches que atraviesan la sección con la incidencia y ordenarlos de mayor a menor volumen, obteniendo lo siguiente:

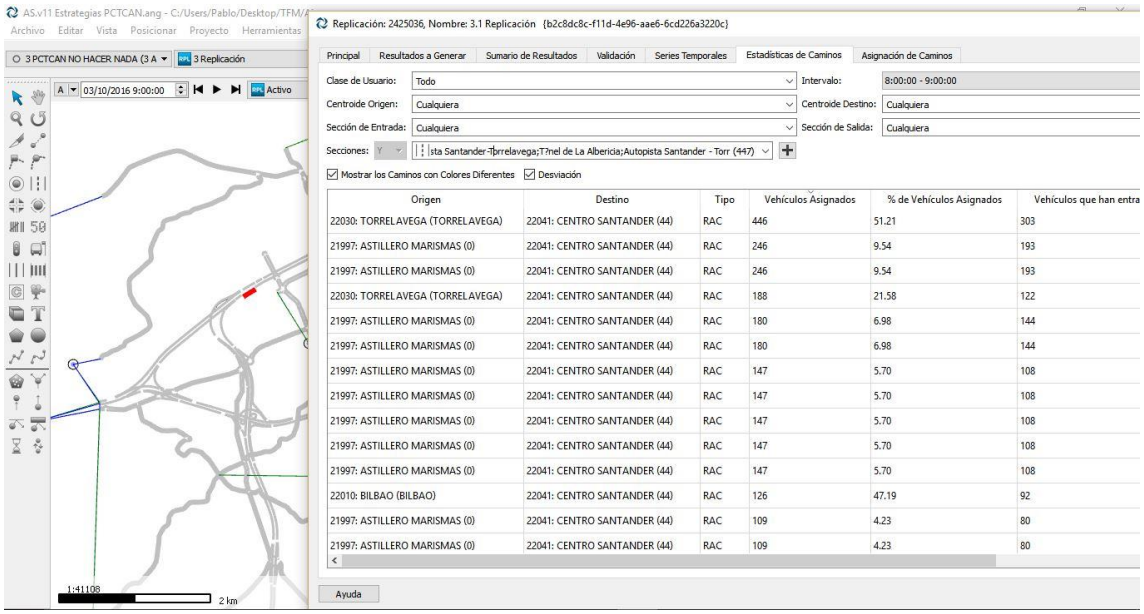


Figura 34: Estadísticas de caminos del accidente PCTCAN

Lo primero que observamos es que la mayor parte de los vehículos conflictivos van al centro de Santander, (que no a la entrada de Santander por la calle castilla, ese centroide se llama Santander-1), y concretamente el principal flujo viene desde Torrelavega. La estrategia inicial se centra en gestionar esos vehículos.

La primera medida para hacerlo es forzar a los coches a tomar la A-67 en el siguiente giro:

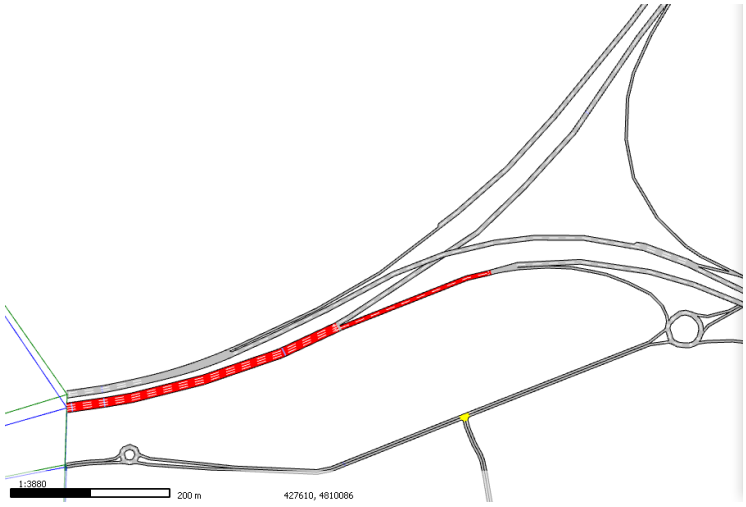


Figura 35: Giro inicial de la A-67 para evitar tomar la S-20.

Sin embargo, pronto se ve la necesidad de redirigir los coches más lejos, puesto que los vehículos no siguen rutas aceptables tras ese giro. Se escogen dos reenrutamientos principales, uno que va hacia peñacastillo y las nacionales, y otro que va por la A-67 hasta la S-10.

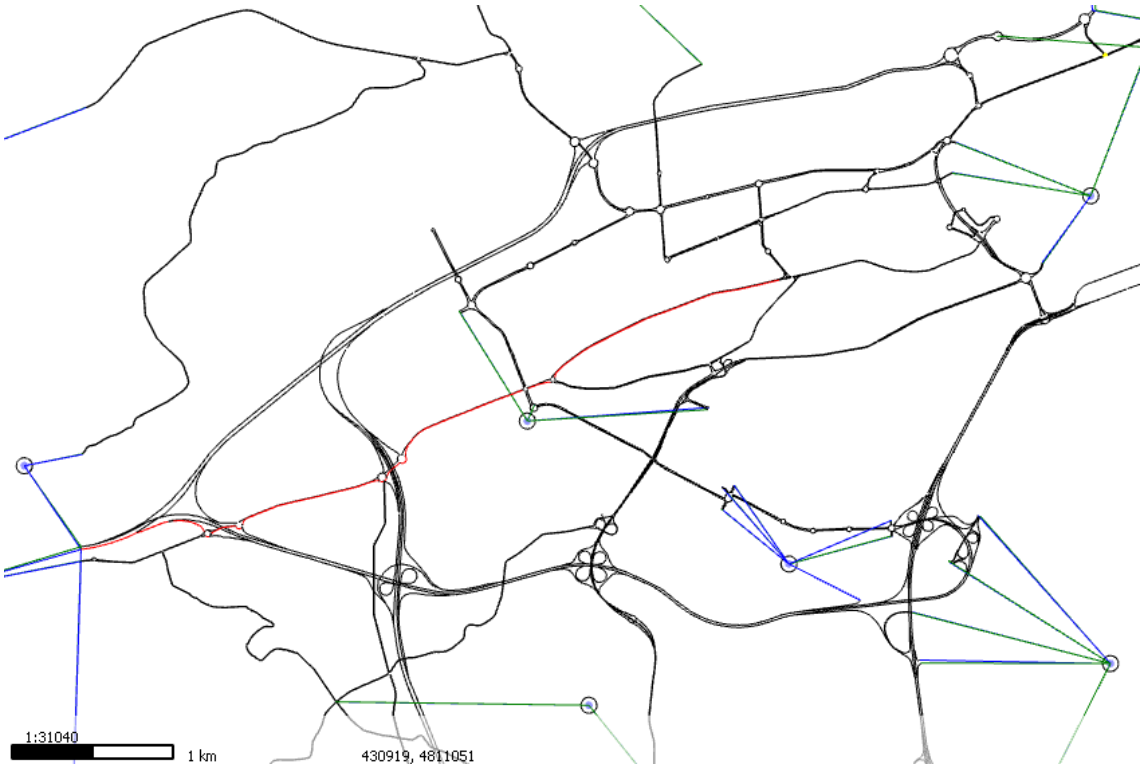


Figura 36: Ruta A-67 – Peñacastillo

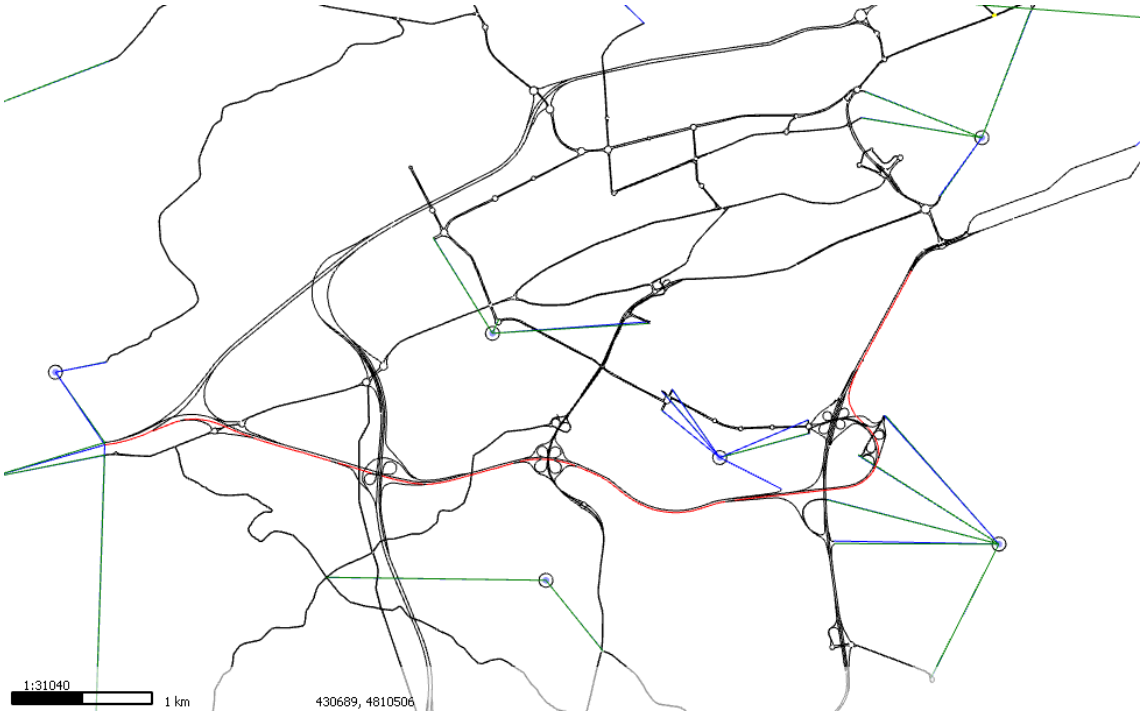


Figura 37: Ruta A-67 – S-10

De este modo se evitan los comportamientos absurdos de los conductores, tales como son volver desde Peñacastillo al punto de la accidente a través de uno de los dos ramales a la S-20 desde la A-67 y desde la S-30. También se prueba a cerrar el ramal que da acceso desde la rotonda al ramal de la S-30, pero eso perjudica a otros conductores.

Figura 38: Punto desde el que retornan los conductores desviados a Peñacastillo si no se les informa de lo contrario.

Se procede a aplicar el desvío inicial fuera de la S-20 sólo a los conductores que entran a la red por la A-67 y van al centro de Santander. Además, se confirma que la mejor opción es que sigan rutas predefinidas desde el primer giro hasta prácticamente su destino.

Se comprueba que los resultados entre repartir 50-50 entre Peñacastillo y S-10 a los coches que van hacia el centro de Santander da un flujo inaceptablemente bajo, 200 por debajo de la simulación sin incidencias. (No se satisface la demanda). Lo mismo ocurre con la estrategia 20-80 y la 80-20, con déficits de flujo de 194 y 294 vehículos, respectivamente.

Tabla 7: Resultados de la estrategia 7: 50-50

Estrategia 7: Dividir 50-50.		
Serie Temporal	**Valor**	**Diferencia**
Cola Media - Todo	99,82	16,96
Cola Virtual Máxima - Todo	281	9,00
Cola Virtual Media - Todo	171,17	26,32
Densidad - Todo	6,33	0,05
Flujo - Todo	25575	-200,00
Giros Perdidos - Todo	426	116,00
Número Total de Paradas - Todo	3854,11	560,53
Tiempo de Demora - Todo	9,89	0,67
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Todo	10,97	0,29
Tiempo de Parada - Todo	2,14	0,32
Tiempo de Viaje - Todo	52,43	0,80
Tiempo Total de Viaje - Todo	2833,22	41,11

Estrategia escogida

Descripción

Finalmente la opción de desviar todos los vehículos de la A-67 a Santander Centro por la S-10 (estrategia 0-100) resulta cumplir la demanda. Para que el algoritmo de detección detecte cuanto antes la incidencia y desactive la gestión al desaparecer la congestión, queda con los siguientes umbrales de ocupación:

$$\text{Activación: PCTCAN ON } \begin{cases} dB > 30 \\ dA < 20 \end{cases}$$

$$\text{Desactivación: PCTCAN OFF } \begin{cases} dB < 22 \\ dA > 8 \end{cases}$$

De esta forma la estrategia se activa al minuto de producirse la incidencia y se desactiva a los dos minutos de desaparecer, con un intervalo de detección de un minuto. La razón por la que los umbrales de la desactivación son menores, es porque cuando desaparece la incidencia, la demanda que discurre por la sección es menor, y al estar toda la calzada disponible, la ocupación es menor, por estar parte de la demanda natural desviada hacia otros puntos de la red.

No obstante, se aprecia que esa estrategia hace que en algunos momentos el flujo que circula por la zona de la incidencia sea muy pequeño, con lo que el algoritmo desactiva la estrategia automáticamente aunque la incidencia siga bloqueando el paso. Tras una de esas desactivaciones, como el tráfico vuelve a fluir por la S-20, a los pocos minutos el algoritmo vuelve a detectar congestión y a activar la incidencia. Eso no es del todo inconveniente, ya que permite cierta flexibilidad al algoritmo para activar y desactivar la estrategia cuando haya oscilaciones de la demanda. No obstante, el desempeño de la estrategia es mejor si el algoritmo desvía menos un porcentaje de los coches todo el tiempo, que si la estrategia desvía el 100 % de sus vehículos objetivo (los que van al centro de Santander) y se desactiva y activa cuando la sección quede vacía.

Figura 39: Ruta por la que se desvía el 70 % de los vehículos que van desde ese punto de la A-67 por la S-10 en la estrategia elegida.

Siguiendo este razonamiento, se ha obtenido que para las condiciones simuladas, la estrategia óptima es aquella en la que se desvían hacia la S-10 los coches que vienen por la A-67 hacia el centro de Santander para que no pasen por la S-20, pero desviándose el 70% de esos vehículos. Los resultados de esta estrategia son los siguientes:

- Zona de la incidencia sin prácticamente congestión.

- Un flujo superior al de la estrategia sin incidencias (algunos vehículos extra consiguen entrar).
- El tráfico desviado no colapsa otros puntos de la red.
- Coste de la red del orden de 50 horas superior al escenario sin incidencias.

En la siguiente tabla se adjuntan los resultados de la simulación de esta estrategia.

Tabla 8: Resultados de la simulación de la estrategia escogida para gestionar los vehículos en caso de la incidencia PCTCAN

Serie Temporal	Valor	Diferencia
Cola Media - Todo	90,63	7,77
Cola Virtual Máxima - Todo	148,00	-124,00
Cola Virtual Media - Todo	66,62	-78,23
Densidad - Todo	6,35	0,07
Flujo - Todo	26004,00	229,00
Giros Perdidos - Todo	342,00	32,00
Número Total de Paradas - Todo	3407,70	114,12
Tiempo de Demora - Todo	9,73	0,51
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Todo	5,88	-4,80
Tiempo de Parada - Todo	1,98	0,16
Tiempo de Viaje - Todo	52,10	0,47
Tiempo Total de Viaje - Todo	2848,89	56,78

Comparación Nivel de Servicio

A continuación se presentan capturas del mapa de Level of Service (LOS, nivel de servicio) basado en densidad para el instante 8:38:00 en dos zonas: la zona de la incidencia y un tramo de la A-67 por la que se desvían los coches que van al centro de Santander y que se habrían incorporado a la zona de la incidencia.

En las siguientes figuras se puede observar como mejora el nivel de servicio con la solución adoptada, y cómo el tráfico desviado en la solución no perjudica la zona de la A-67. Los mapas más completos se adjuntan en un anexo al estudio. La leyenda es la siguiente:

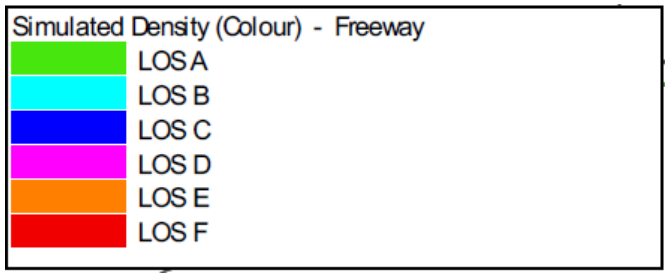


Figura 40: Leyenda de los mapas de nivel de servicio basado en densidad.

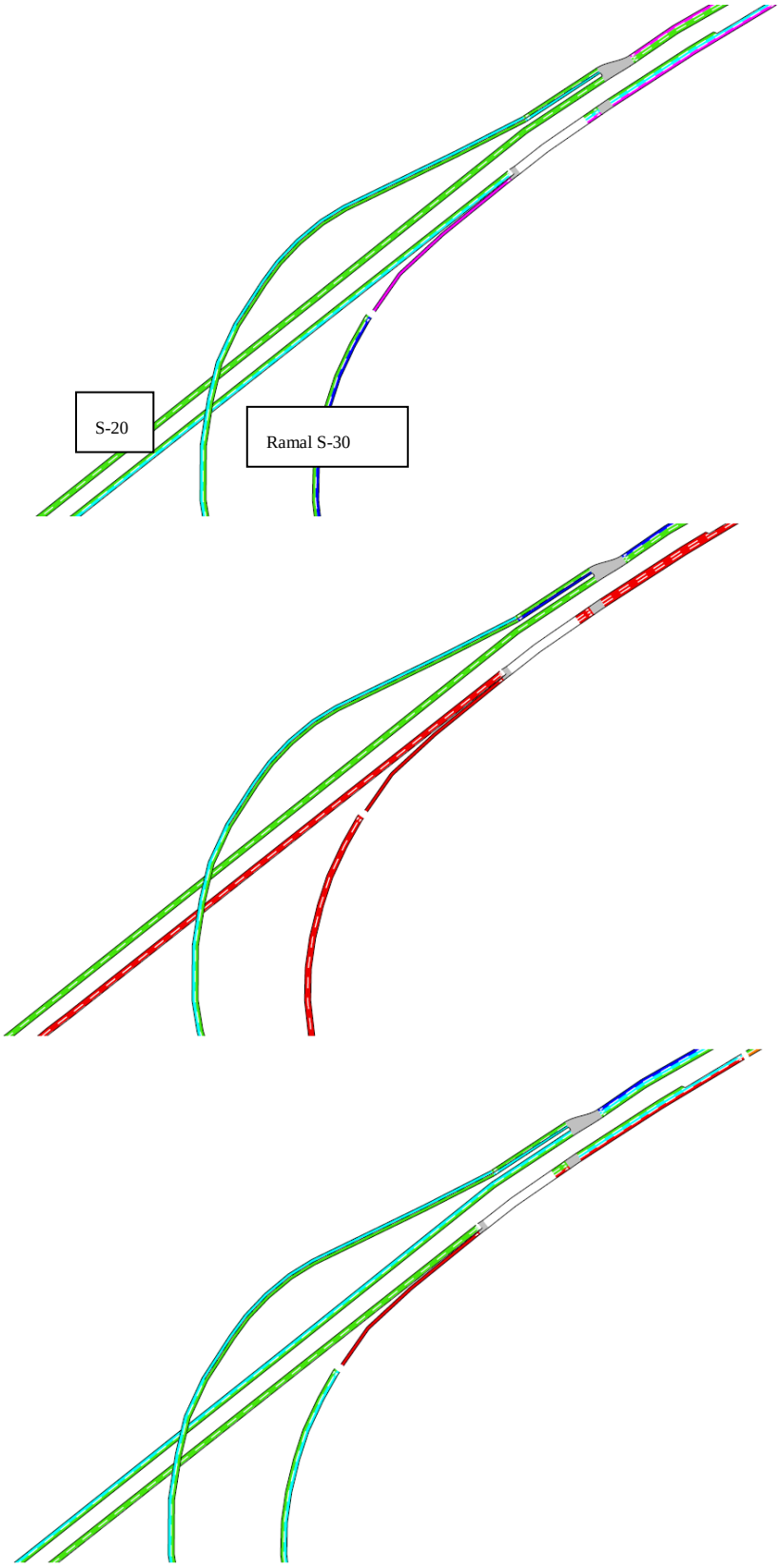


Figura 41: Comparación del nivel de servicio en los diferentes escenarios: sin incidencias, do nothing y solución adoptada en la incidencia PCTCAN en la zona de la incidencia (S-20).

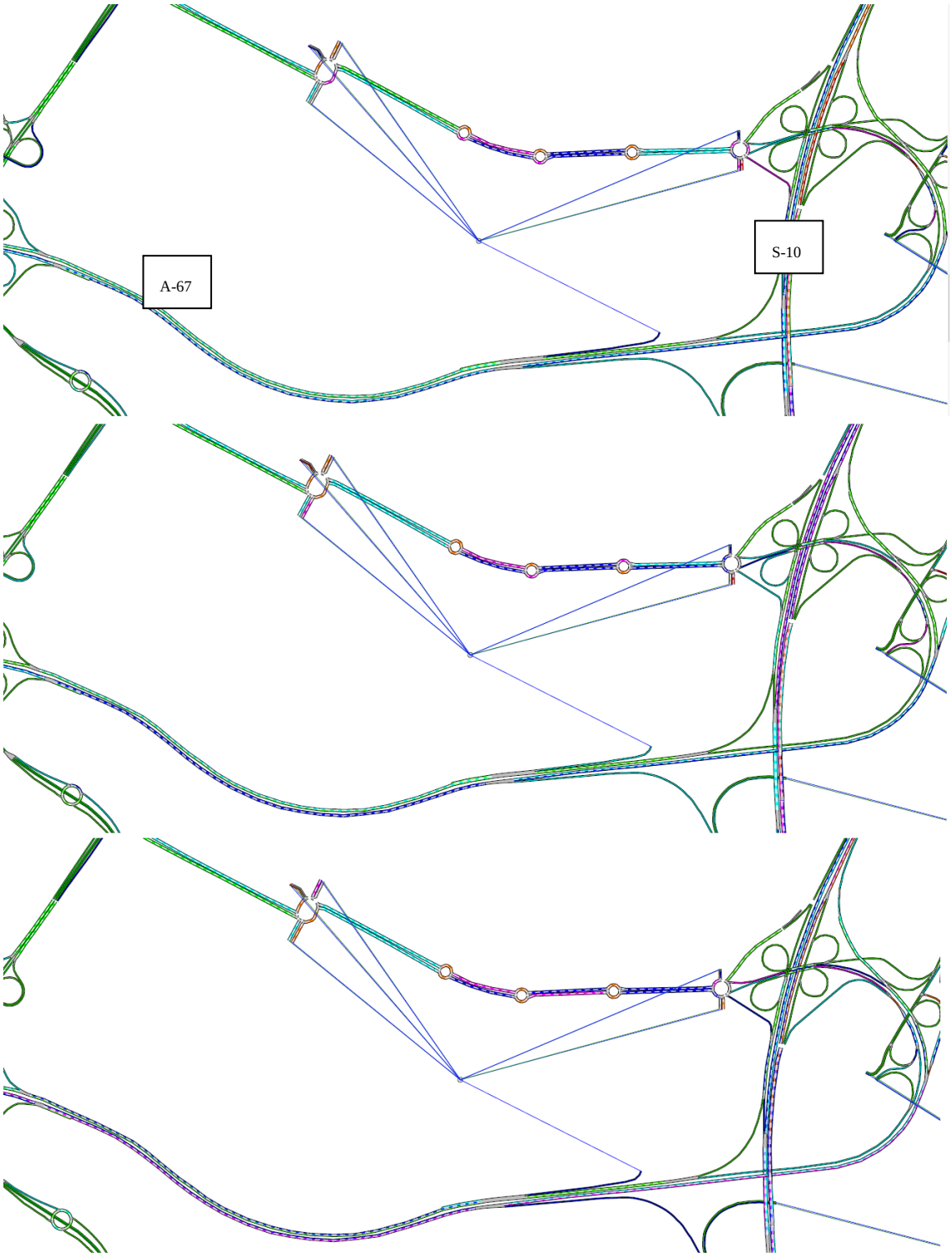


Figura 42: Comparación del nivel de servicio en los diferentes escenarios: sin incidencias, do nothing y solución adoptada en la incidencia PCTCAN en la zona por la que se desvía el tráfico (A-67).

Diagramas espacio-tiempo

En los diagramas espacio-tiempo de densidad y velocidad se aprecia de forma inmediata el impacto que tiene la solución escogida en la zona del incidente y en el tramo de la S-20 que existe aguas arriba del mismo.

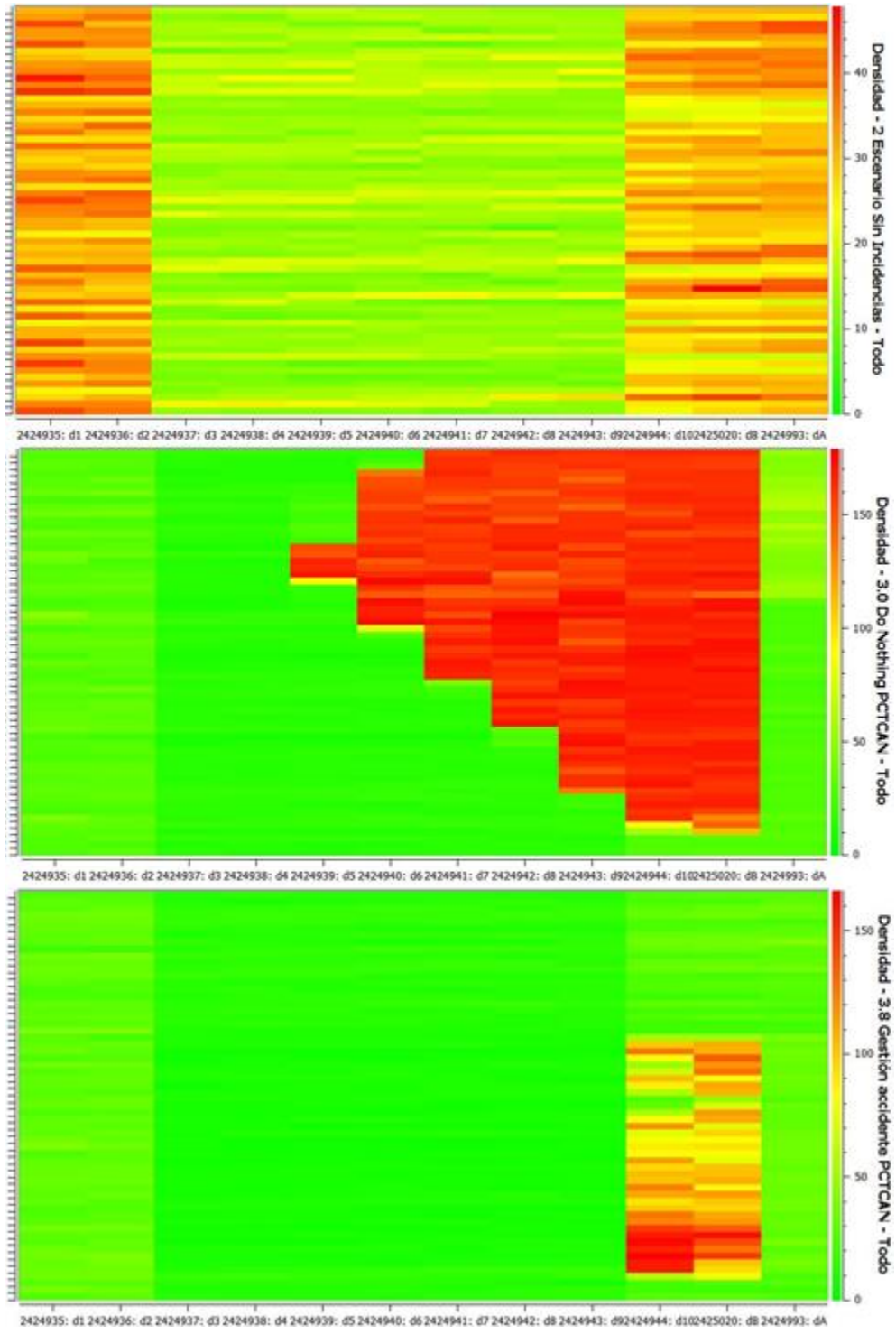


Figura 43: Diagramas espacio – tiempo de densidad para la zona del incidente PCTCAN comparando escenario sin incidencias, do nothing y estrategia escogida.

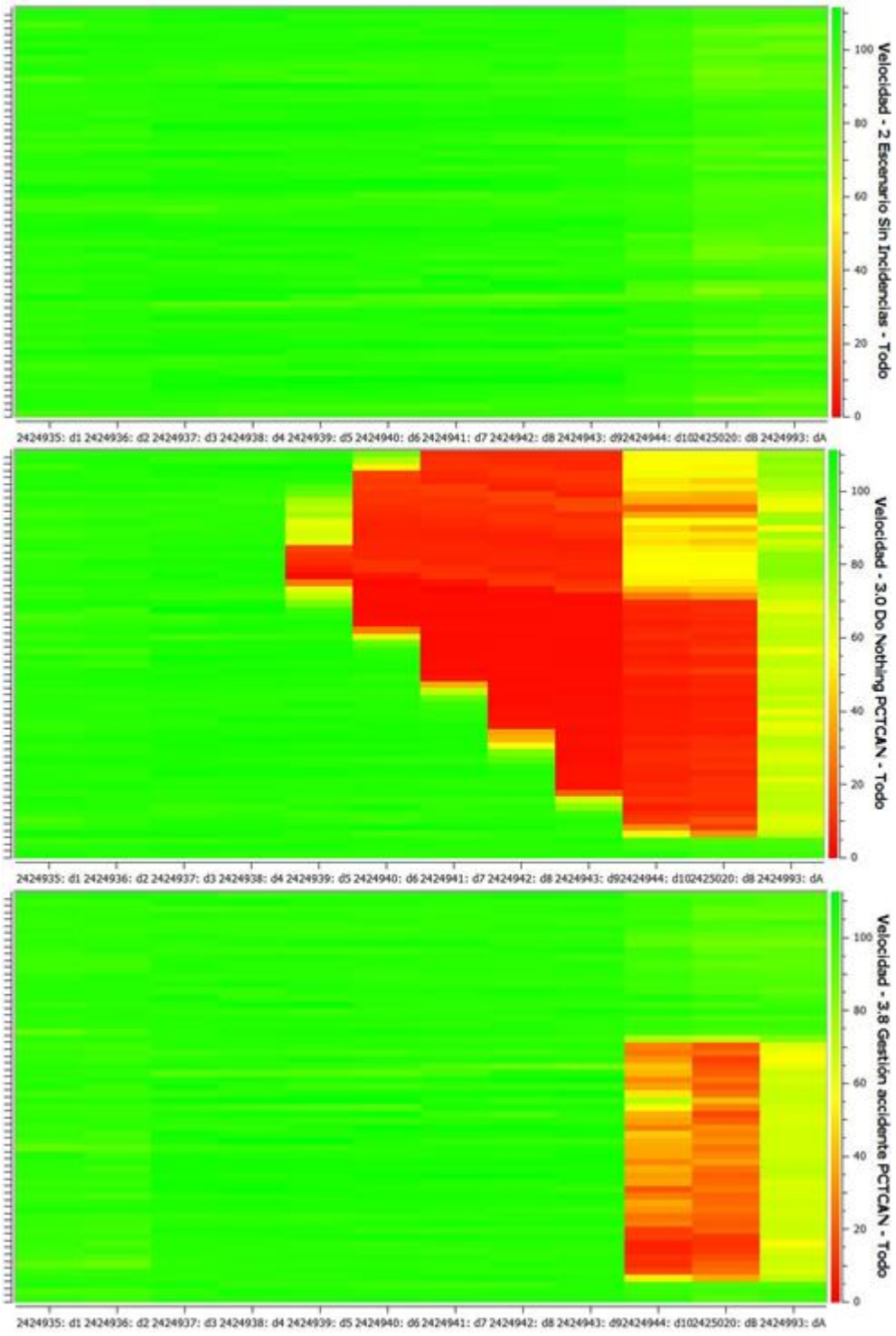


Figura 44: Diagramas espacio – tiempo de velocidad para la zona del incidente PCTCAN comparando escenario sin incidencias, do nothing y estrategia escogida.

10 MODELIZACIÓN EN AIMSUN: DISEÑO DE LA ESTRATEGIA CORTE INGLÉS

Detección

El detector aguas arriba de la incidencia se llama dC, y el detector aguas abajo se llama dD. En la siguiente figura se aprecia de forma gráfica:

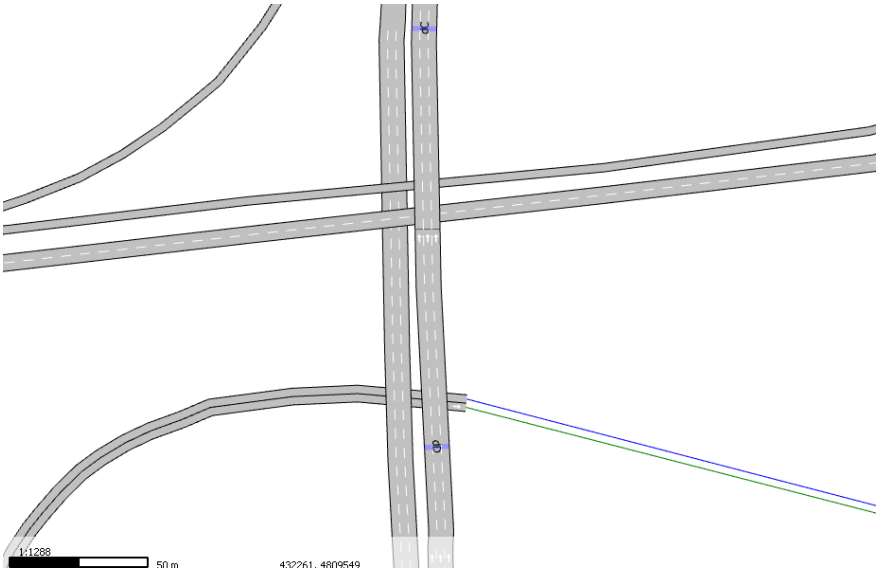


Figura 45: Detectores para detección de la incidencia Corte Inglés (CI).

Los patrones de ocupación asociados a una situación sin incidencias en los detectores son los siguientes:

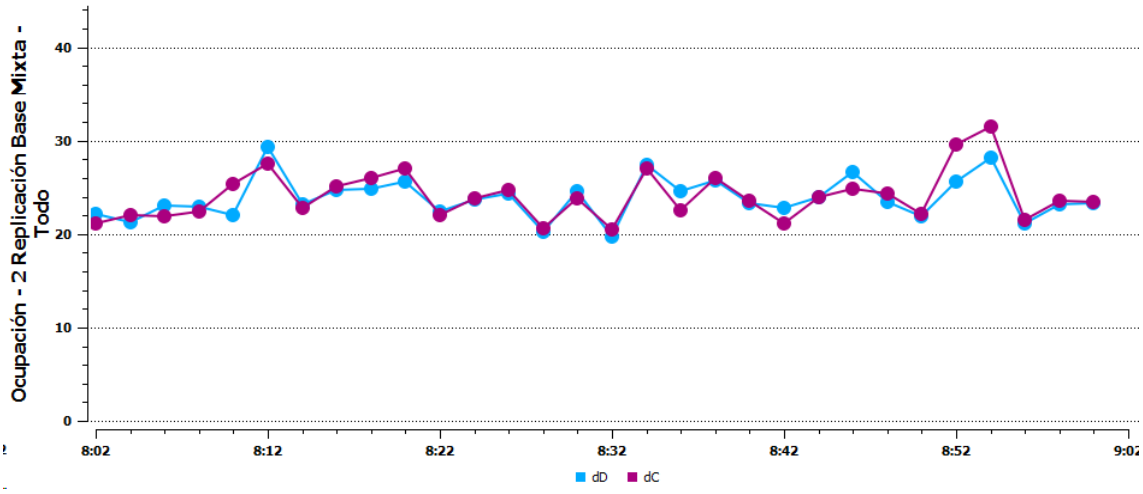


Figura 46: Valores normales de ocupación en dA y dB.

Tabla 9: Valores de ocupación normales en los detectores dC y dD.

Hora	dD	dC	Diferencia
8:02:00	22,14	21,11	-1,03
8:04:00	21,29	22,04	0,74
8:06:00	23,03	21,94	-1,09
8:08:00	22,86	22,38	-0,48
8:10:00	21,99	25,31	3,33
8:12:00	29,29	27,57	-1,72
8:14:00	23,15	22,82	-0,34
8:16:00	24,74	25,09	0,35
8:18:00	24,88	25,93	1,05
8:20:00	25,58	26,98	1,40
8:22:00	22,38	21,97	-0,41
8:24:00	23,69	23,86	0,16
8:26:00	24,29	24,77	0,48
8:28:00	20,28	20,67	0,39
8:30:00	24,65	23,77	-0,88
8:32:00	19,70	20,45	0,75
8:34:00	27,44	26,97	-0,47
8:36:00	24,53	22,59	-1,94
8:38:00	25,77	26,00	0,23
8:40:00	23,32	23,57	0,25
8:42:00	22,84	21,18	-1,66
8:44:00	23,98	23,97	-0,02
8:46:00	26,58	24,88	-1,70
8:48:00	23,40	24,33	0,93
8:50:00	21,93	22,11	0,18
8:52:00	25,58	29,62	4,04
8:54:00	28,16	31,52	3,35
8:56:00	21,13	21,45	0,32
8:58:00	23,11	23,55	0,43
9:00:00	23,30	23,46	0,15

Como vemos en la anterior figura y tabla, los valores de ocupación normales oscilan entre 19 y 31, con una media en torno a 23, y usualmente similares en ambos detectores. Se emplea esta información para calibrar el ADI, de forma que detecte la incidencia lo antes posible (en 2 minutos como máximo) y desactive la estrategia en cuanto deje de ser necesaria.

La activación y desactivación de la gestión (umbrales del algoritmo) se va optimizando según se simulan escenarios con diferentes estrategias. Los primeros valores con los que se testea son:

$$\text{Activación: CI ON } \begin{cases} dD > 33 \\ dC < 28 \end{cases}$$

$$\text{Desactivación: CI OFF } \begin{cases} dD < 33 \\ dC > 28 \end{cases}$$

No obstante, estos valores serán corregidos hasta los obtenidos en la solución definitiva.

Escenario *Do Nothing*

El escenario *Do Nothing* plantea el umbral inferior de aceptación de cualquier estrategia. Ninguna estrategia es aceptable si no obtiene un resultado significativamente mejor a este escenario. En la siguiente imagen se aprecia una captura del estado de la red en este escenario, concretamente segundos después de la liberación de la incidencia a las 08:38:00. Como vemos, la S-10 presenta una congestión muy importante que alcanza varios kilómetros (se sale de la vista).

Figura 47: Ejemplo del estado de la S-10 en el escenario Do Nothing en el momento de liberación de la incidencia.

En el siguiente gráfico se muestra la evolución de la ocupación en los detectores dC y dD a lo largo del período de simulación. Debido a la congestión elevada, la pérdida de capacidad y a los fenómenos de stop & go, la red no logra recuperarse (apenas se aprecia una cierta histéresis

tras el minuto 8:38). Una parte importante de la demanda de transporte no se satisface durante la simulación, al igual que ocurría en el *Do Nothing* de la incidencia PCTCAN.

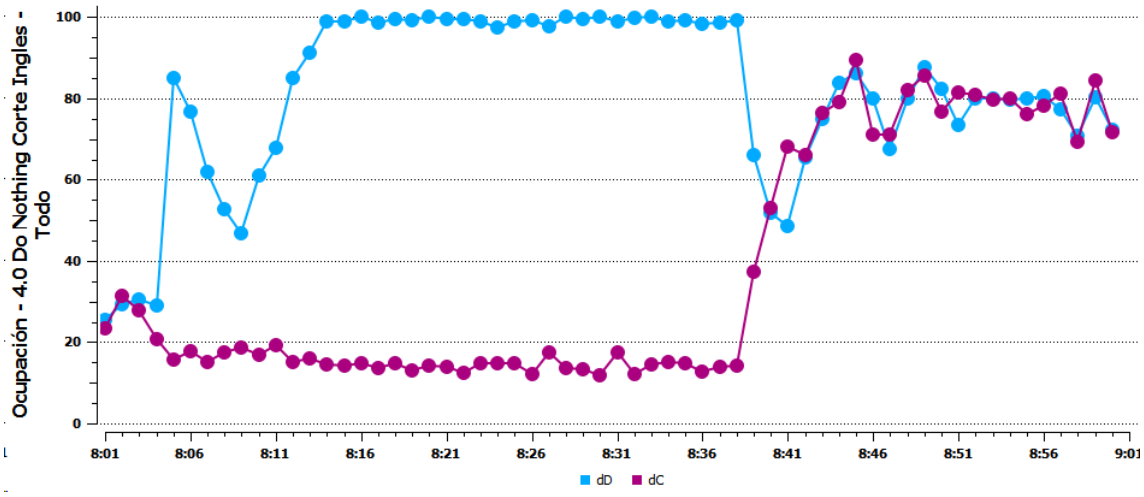


Figura 48: Evolución de la ocupación en los detectores dC y dD en el escenario Do Nothing con la incidencia CI..

Los resultados de las series temporales de la simulación son los siguientes. La tercera columna expresa la diferencia con el escenario sin incidencias:

Tabla 10: Resultados del escenario Do Nothing con incidencia PCTCAN

Do Nothing		
Serie Temporal	**Valor**	**Diferencia**
Cola Media - Todo	521,45	438,59
Cola Virtual Máxima - Todo	296,00	24,00
Cola Virtual Media - Todo	93,46	-51,39
Densidad - Todo	7,64	1,36
Flujo - Todo	24952,00	-823,00
Giros Perdidos - Todo	558,00	248,00
Número Total de Paradas - Todo	3822,73	529,15
Tiempo de Demora - Todo	18,96	9,74
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Todo	5,64	-5,04
Tiempo de Parada - Todo	9,25	7,43
Tiempo de Viaje - Todo	61,44	9,81
Tiempo Total de Viaje - Todo	3245,04	452,93

El resultado de “Flujo” confirma la hipótesis de que la demanda no queda satisfecha.

Búsqueda de la estrategia óptima

La búsqueda de la estrategia óptima para el escenario CI, como en el caso anterior, empieza por consultar las estadísticas de caminos de los coches que atraviesan la sección con la incidencia y ordenarlos de mayor a menor volumen, obteniendo lo siguiente:

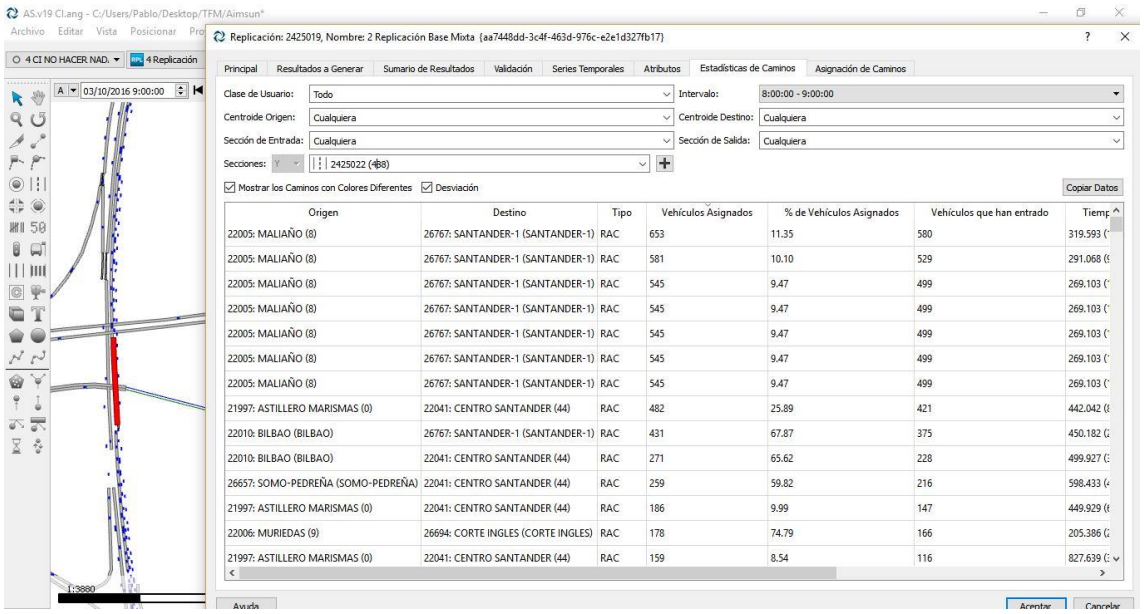


Figura 49: Estadísticas de caminos de los vehículos que pasan por la zona de la incidencia CI.

La mayoría de los vehículos asignados viene de Maliaño, Astillero, Bilbao, Somo-Pedreña y Muriedas, y en general van o bien al centro de Santander, o bien a la entrada sur de Santander (Santander – 1).

La geometría de la zona en este caso es más simple, y las características de la congestión son más sencillas, por lo que el método de trabajo es más claro que en el caso anterior. En este caso, la congestión esta causada fundamentalmente por vehículos que recorren la S-10 desde el sur con el objetivo de llegar a Santander. La solución pasará por tanto de dar salida a esos vehículos por los enlaces por los que sea posible a otras rutas, de forma que lleguen a su destino por una ruta alternativa o bypasseen la zona de la incidencia.

La primera estrategia que se plantea pasa por desviar los vehículos que, desde Maliaño quieren llegar a Santander. Para ello se emplea el mismo enlace que usan para incorporarse a la S-10, y se les hace dar la vuelta para llegar a la A-67 a través de la CA-140 y la N-623. Una vez en la A-67, la recorren hasta incorporarse a la S-10 en un punto posterior al accidente, bypasseando el punto de conflicto.

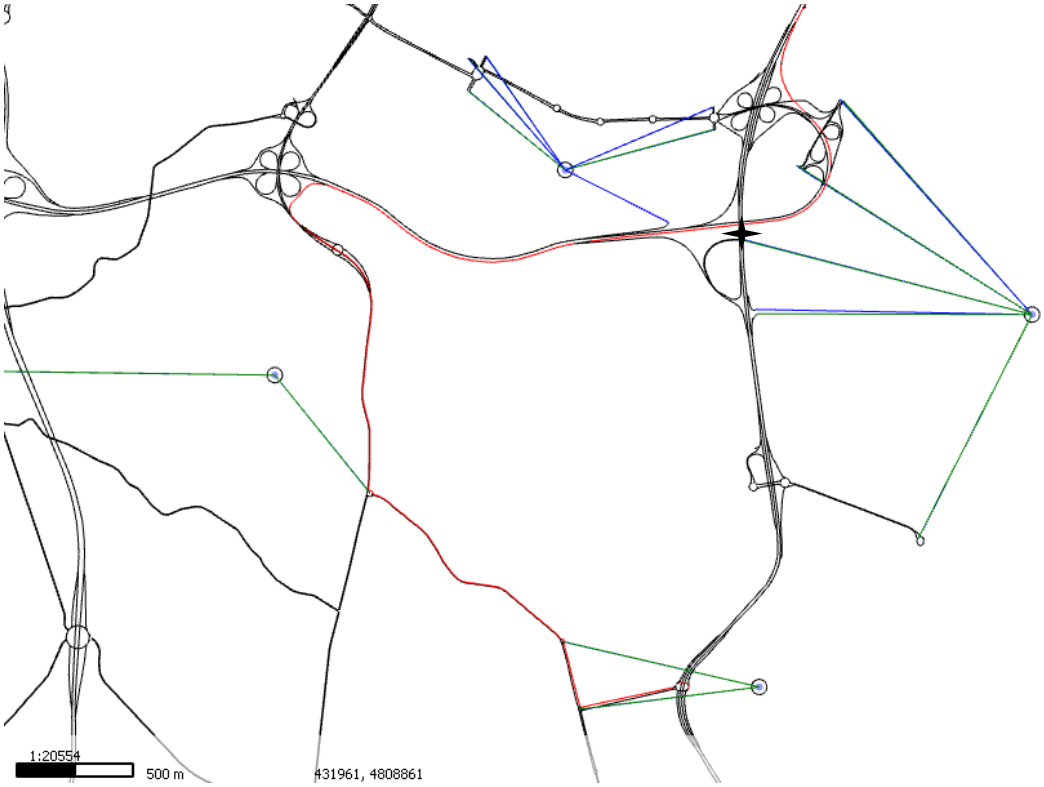


Figura 50: Ruta con la que se bypassea el tráfico de Maliaño para que evite la incidencia, marcada con una estrella negra.

La simulación de la estrategia lleva a la conclusión de que esta medida, aunque útil, resulta insuficiente, como puede apreciarse en los resultados. La tercera columna expresa la diferencia con el escenario sin incidencias:

Tabla 11: Resultados de la simulación de la primera estrategia para la incidencia Corte Inglés, consistente en desviar el tráfico de Maliaño a Santander por un bypass.

E1: Desvío tráfico de Maliaño		
Serie Temporal	**Valor**	**Diferencia**
Cola Media - Todo	299,05	216,19
Cola Virtual Máxima - Todo	209,00	-63,00
Cola Virtual Media - Todo	101,85	-43,00
Densidad - Todo	7,19	0,91
Flujo - Todo	25397,00	-378,00
Giros Perdidos - Todo	348,00	38,00
Número Total de Paradas - Todo	4000,83	707,25
Tiempo de Demora - Todo	14,71	5,49
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Todo	8,66	-2,02
Tiempo de Parada - Todo	5,14	3,32
Tiempo de Viaje - Todo	57,24	5,61

Tiempo Total de Viaje - Todo	3128,28	336,17

Se procede a una segunda estrategia en la que se procede al desvío del tráfico de astillero. Este tráfico tiene que salir por el mismo enlace de Maliaño, que tiene una rotonda y un ramal con una capacidad claramente insuficientes al tráfico que va de Astillero a Santander. El resultado es que si se intenta sacar ese tráfico por ese punto, el ramal se congestiona y se traslada el problema de congestión del incidente a ese punto aguas arriba. Por tanto se concluye que el tráfico de Astillero no debe desviarse.

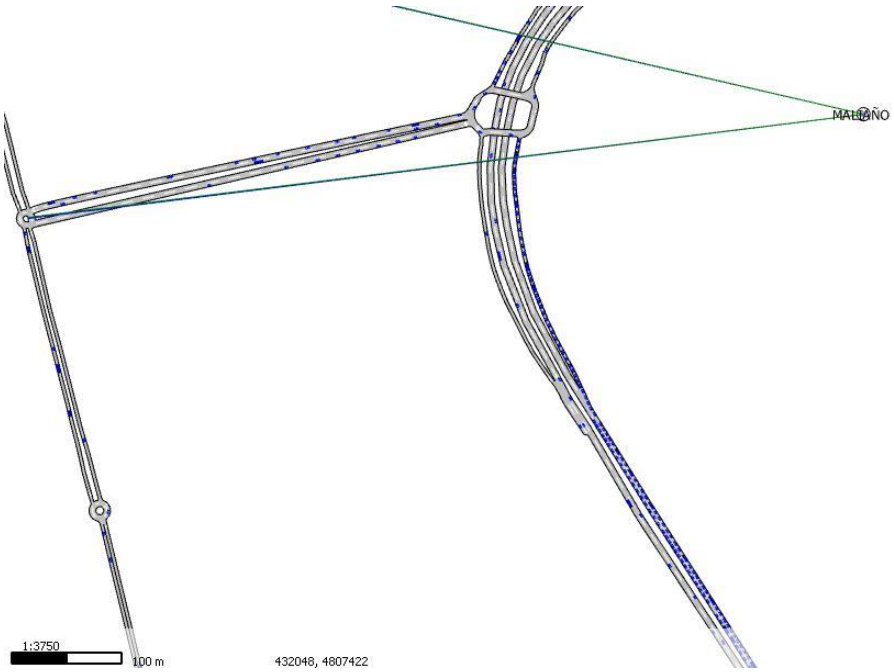


Figura 51: Enlace de Maliaño por el que no se puede evacuar el tráfico de Astillero. La congestión debido a la poca capacidad del ramal es apreciable en la imagen.

A continuación se procede desviar el tráfico de Bilbao a Santander. Se contempla en seguida que desviar sólo el tráfico hacia uno de los centroides de Santander sigue siendo insuficiente, por lo que se desvía el tráfico de los coches que van tanto al centro de la ciudad como los que van a la entrada sur. Sin embargo, la simulación refleja que si se desvían por la misma ruta, se colapsan las intersecciones de la zona cercana a Santander por el exceso de tráfico. Esto motiva a la creación de dos redireccionamientos distintos para los coches que llegan desde el inicio de la S-10 y quieren llegar a Santander, lo cual soluciona el problema. Aunque se planteó la ruta 1 para los coches destino centro y la 2 para los coches destino entrada sur, bastaría con repartirlos al 50-50. La ruta 1 va por la S-30, después los desvía hacia el este para coger la S-20. No sigue inmediatamente hasta la S-20 para no congestionar el ramal. La ruta 2, en cambio, pasa de la S-30 a la A-67 y de ahí los desvía a Peñacastillo, para que no entorpezcan a los coches de Maliaño que quieren incorporarse a la A-67 desde la N-623.

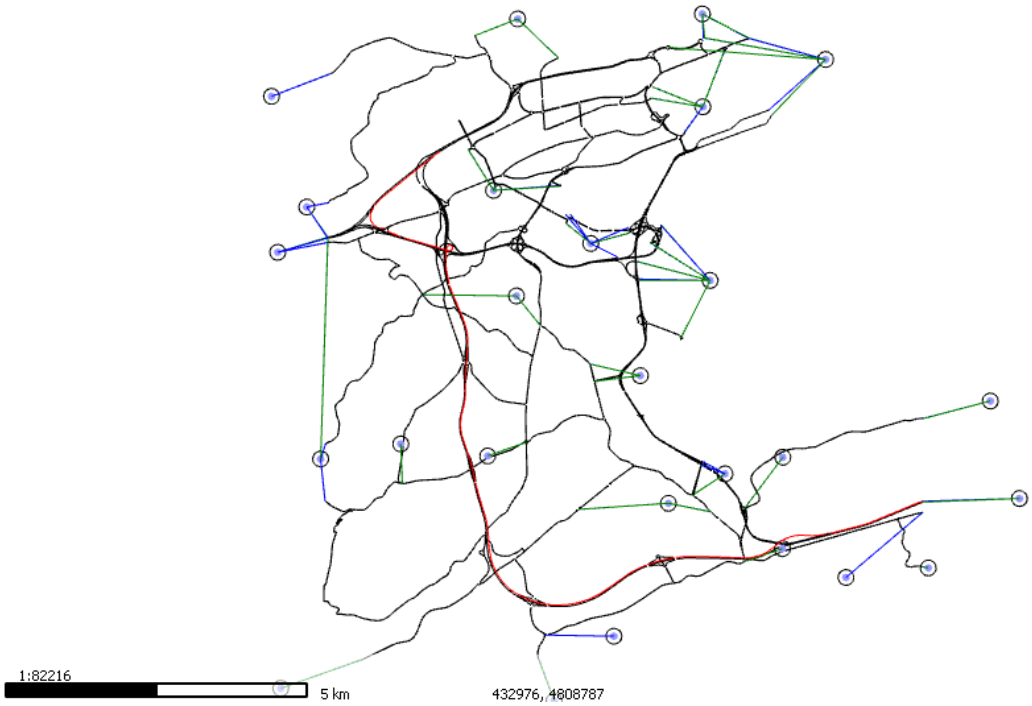


Figura 52: Ruta 1 Bilbao – Santander. Este desvío se recomienda principalmente para los vehículos con destino el centro de la ciudad.

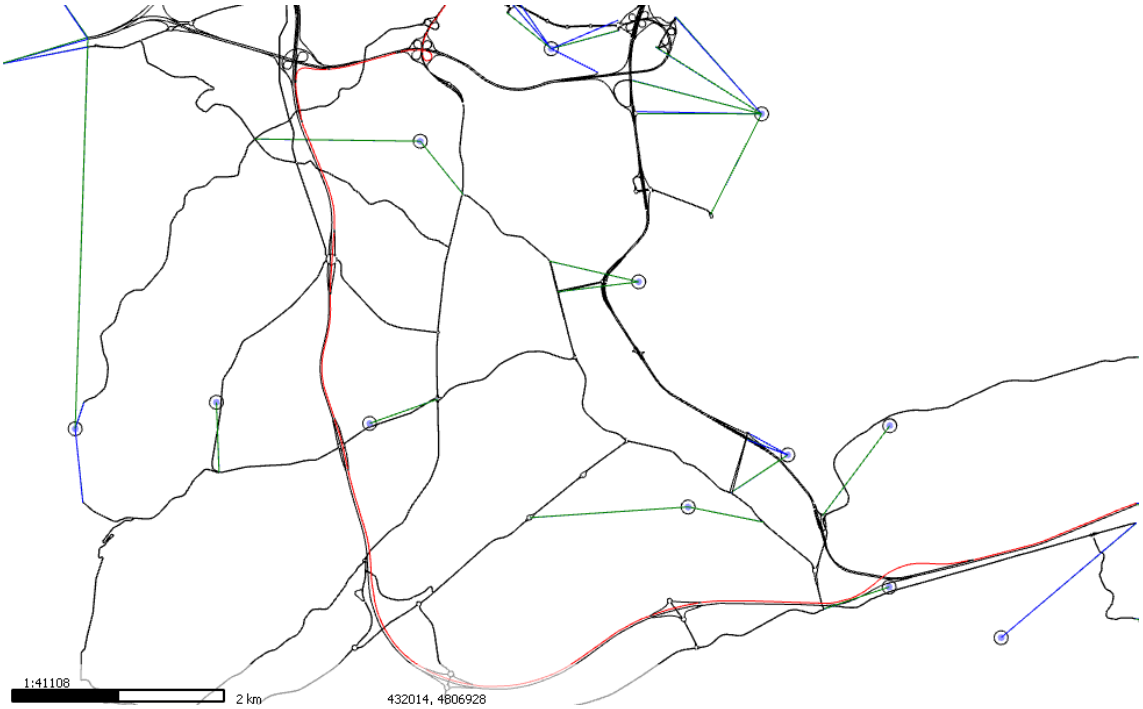


Figura 53: Ruta 2 Bilbao – Santander. Este desvío se recomienda principalmente para los vehículos con destino el sur de la ciudad.

Como último añadido, se simula el desvío de los vehículos de Somo – Pedreña por una cuarta ruta. Esta ruta consiste en que lleguen a la S-30 y la recorran hasta el norte, de forma que

se incorporan de forma directa a la S-20, desde un punto distinto a desde donde lo hacen los de Bilbao que cogen la S-30.

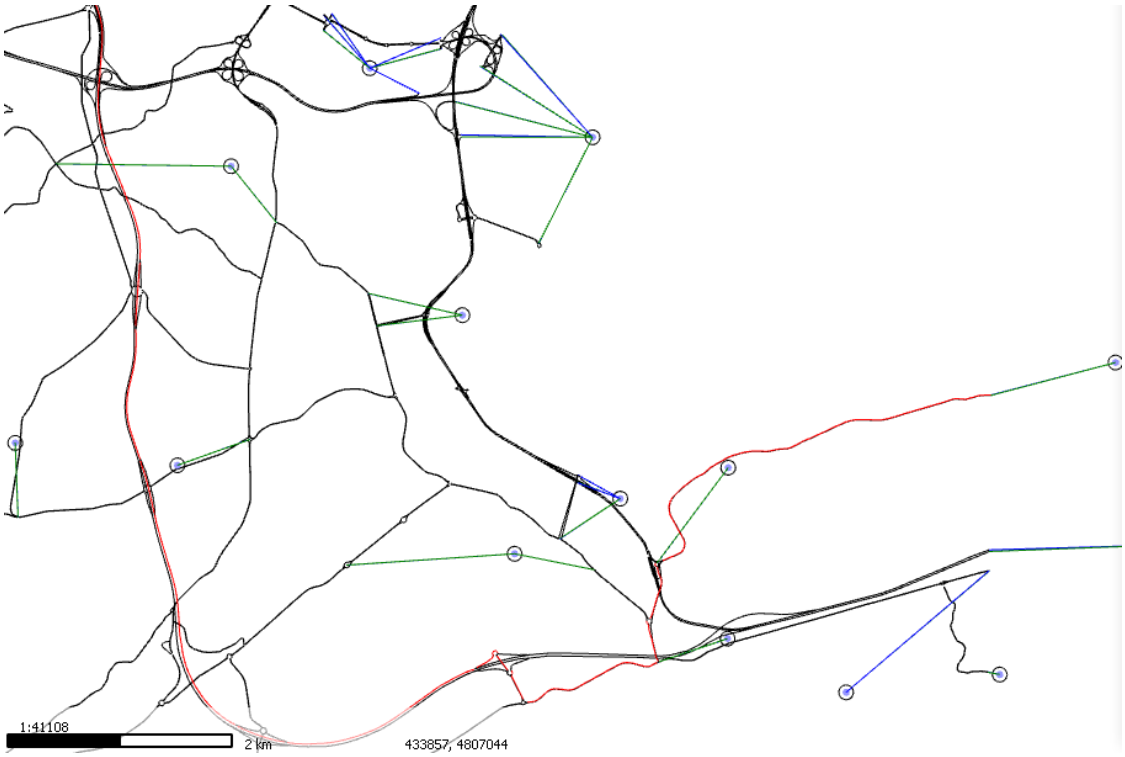


Figura 54: Ruta Somo – Pedreña. La ruta sigue hasta incorporarse a la S-20 desde la S-30.

Estrategia escogida

Descripción

Finalmente, se opta por la estrategia que combina los desvíos citados para los vehículos de Maliaño, de Bilbao, y de Somo – Pedreña con sus cuatro rutas correspondientes. Esta estrategia no consigue evitar completamente la congestión en la S-10, pero la reduce considerablemente de forma que se satisface la demanda y al final del período de simulación la situación está restablecida. El algoritmo de detección de incidencias finalmente queda:

$$\text{Activación: CI ON } \begin{cases} dD > 33 \\ dC < 28 \end{cases}$$

$$\text{Desactivación: CI OFF } \begin{cases} dD < 33 \\ dC > 10 \end{cases}$$

Este algoritmo activa la estrategia de gestión al minuto de producirse la incidencia y desactiva la estrategia cuatro minutos tras desaparecer la incidencia. El umbral bajo de la desactivación se debe a que la demanda de la S-10 ha bajado mucho debido a la estrategia, luego en la situación normal, la S-10 presenta una ocupación muy baja cuando la estrategia sigue activa. El algoritmo debe detectar esa ocupación tan baja y desactivar la estrategia, como sucede.

Esta estrategia funciona intentando desviar todos los vehículos, (aunque algunos se resistan a ello), y su característica más particular es la necesidad de que los diferentes desvíos sigan rutas relativamente concretas que eviten que los vehículos desviados desde diferentes puntos se concentren en puntos vulnerables de la red, especialmente ramales de acceso y glorietas.

En concreto, se han desviado los vehículos de Maliaño a Santander por una ruta, los de Bilbao al centro por otra, los de Bilbao a la entrada sur por otra y los de Somo – Pedreña a Santander por una cuarta ruta. La aplicabilidad sigue existiendo si lo que se hace es alternar los vehículos de Bilbao entre esas dos rutas. Los resultados de la aplicación de esta estrategia son los siguientes:

- La congestión en la S-10 se reduce mucho, apenas llega hasta el enlace más inmediato aguas arriba, restableciéndose la situación normal para cuando termina el período de simulación.
- Un flujo superior al de la estrategia sin incidencias (algunos vehículos extra consiguen entrar).
- El tráfico desviado no colapsa otros puntos de la red.
- Coste de la red del orden de 300 horas superior al escenario sin incidencias.

Tabla 12: Resultados de la simulación de la estrategia escogida para gestionar los vehículos durante la incidencia Corte Inglés

Serie Temporal	Valor	Diferencia
Cola Media - Todo	186,98	104,12
Cola Virtual Máxima - Todo	146,00	-126,00
Cola Virtual Media - Todo	85,95	-58,90
Densidad - Todo	6,96	0,68
Flujo - Todo	25858,00	83,00
Giros Perdidos - Todo	411,00	101,00
Número Total de Paradas - Todo	3846,99	553,41
Tiempo de Demora - Todo	12,07	2,85
Tiempo de Espera en Cola Virtual - Todo	8,46	-2,22
Tiempo de Parada - Todo	3,70	1,88
Tiempo de Viaje - Todo	54,44	2,81
Tiempo Total de Viaje - Todo	3090,30	298,19

Comparación Nivel de Servicio

A continuación se presentan capturas del mapa de Level of Service (LOS, nivel de servicio) basado en densidad para el instante 8:38:00 en dos zonas: la zona de la incidencia y un tramo de la A-67 en un plano general del área por la que se desvían los coches que van al centro de Santander y que se habrían incorporado a la zona de la incidencia.

En las siguientes figuras se puede observar como mejora el nivel de servicio con la solución adoptada, limitando el alcance de la congestión, y cómo el tráfico desviado en la solución no perjudica ningún área. Los mapas más completos se adjuntan en un anexo al estudio. La leyenda es la siguiente:

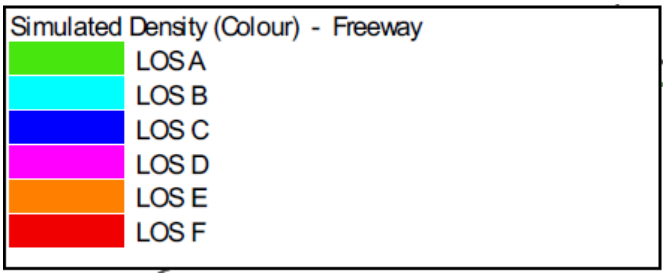


Figura 55: Leyenda de los mapas de nivel de servicio basado en densidad.

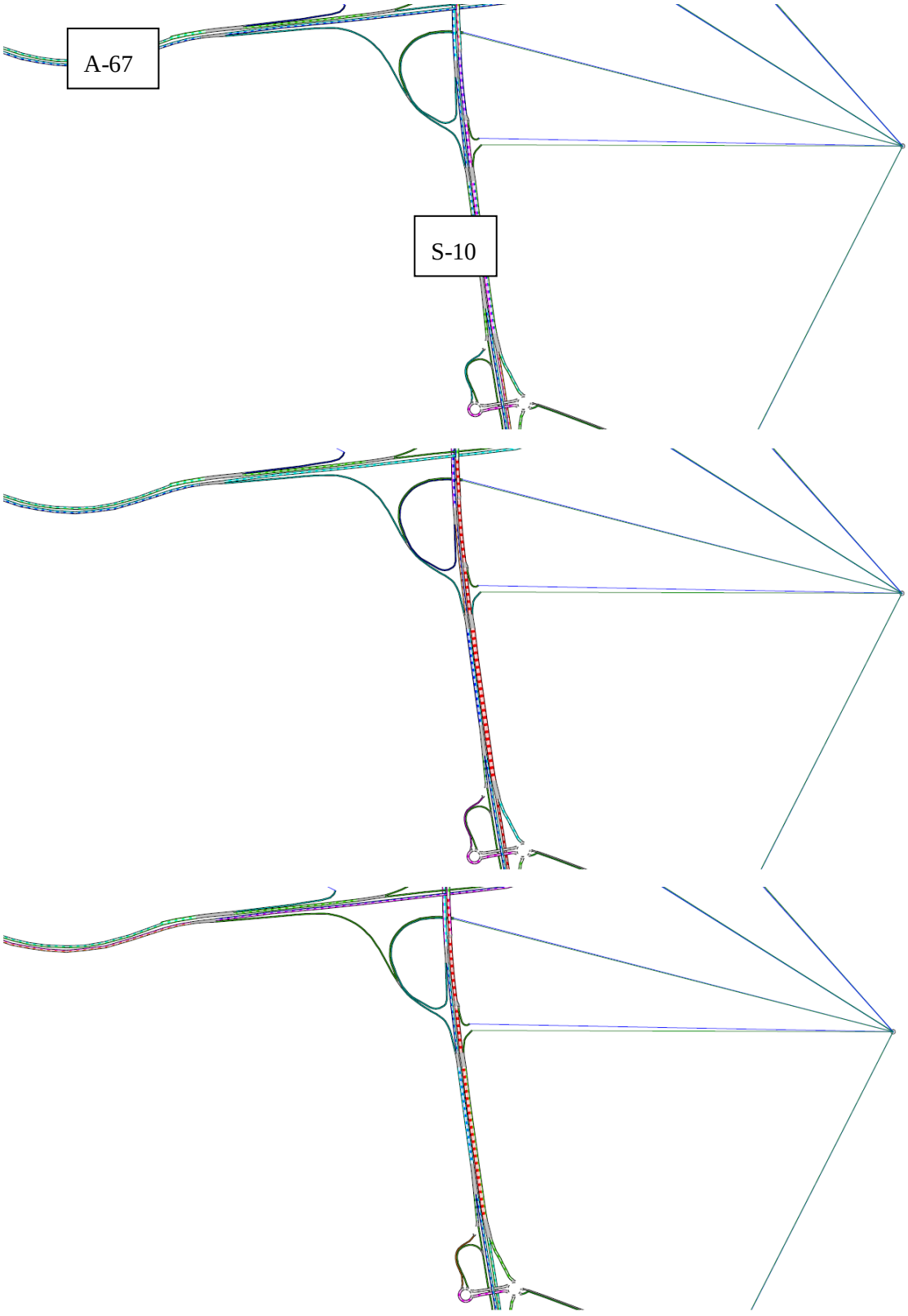


Figura 56: Nivel de servicio en la zona de la congestión, para los escenarios sin incidencia, do nothing y estrategia escogida para la incidencia Corte Inglés. Se aprecia como la estrategia escogida limita el alcance de la congestión, que no llega al segundo enlace.

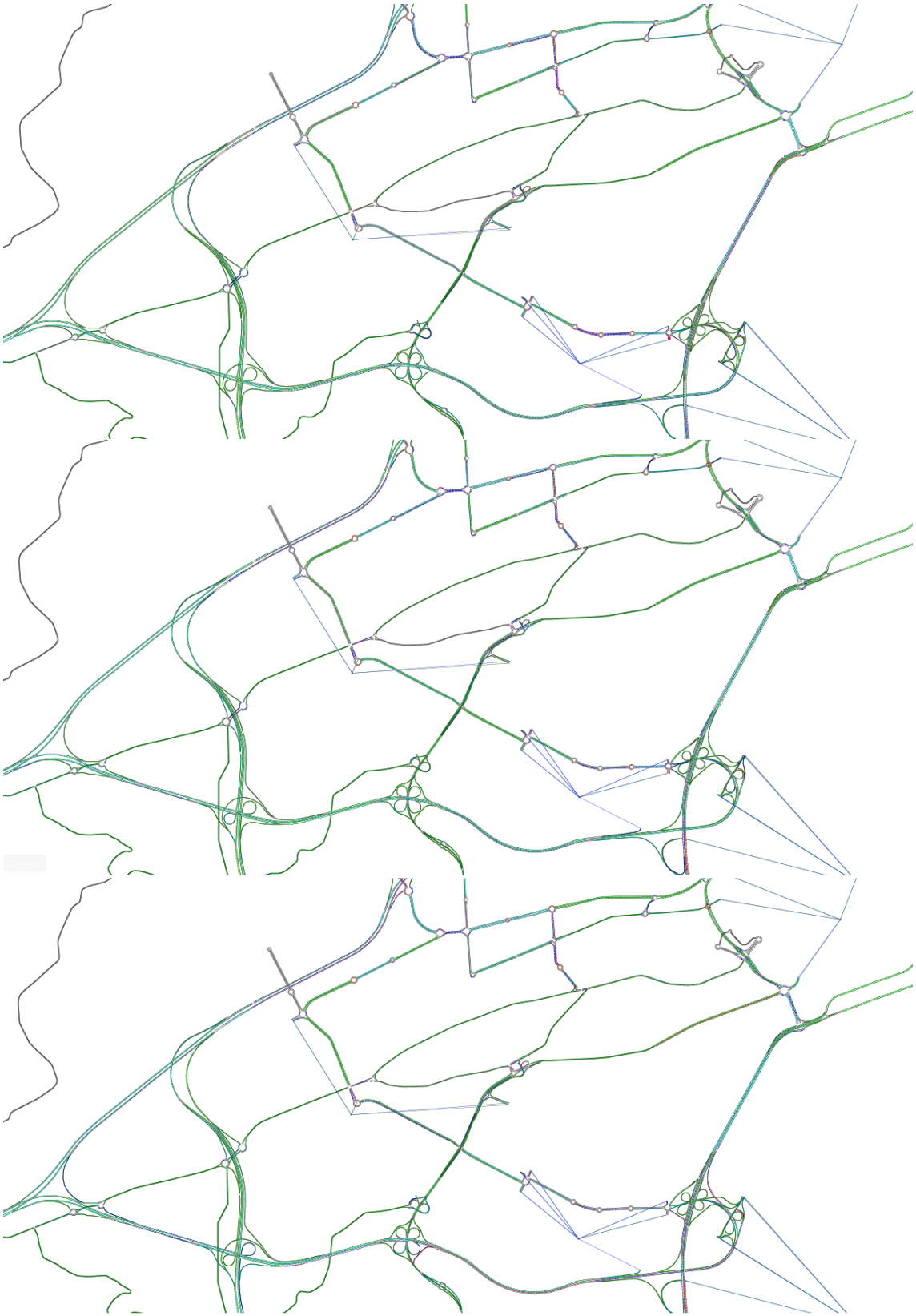


Figura 57: Vista general del nivel de servicio para los escenarios sin incidencias, do nothing Corte Ingles y estrategia escogida para la incidencia Corte Ingles. El nivel de servicio apenas sube por la zona a pesar de estar desviando el tráfico de la S-10 en el tercer escenario.

Diagramas espacio-tiempo

En los diagramas espacio-tiempo de densidad y velocidad se aprecia de forma inmediata el impacto que tiene la solución escogida en la zona del incidente y en el tramo de la S-10 que existe aguas arriba del mismo.

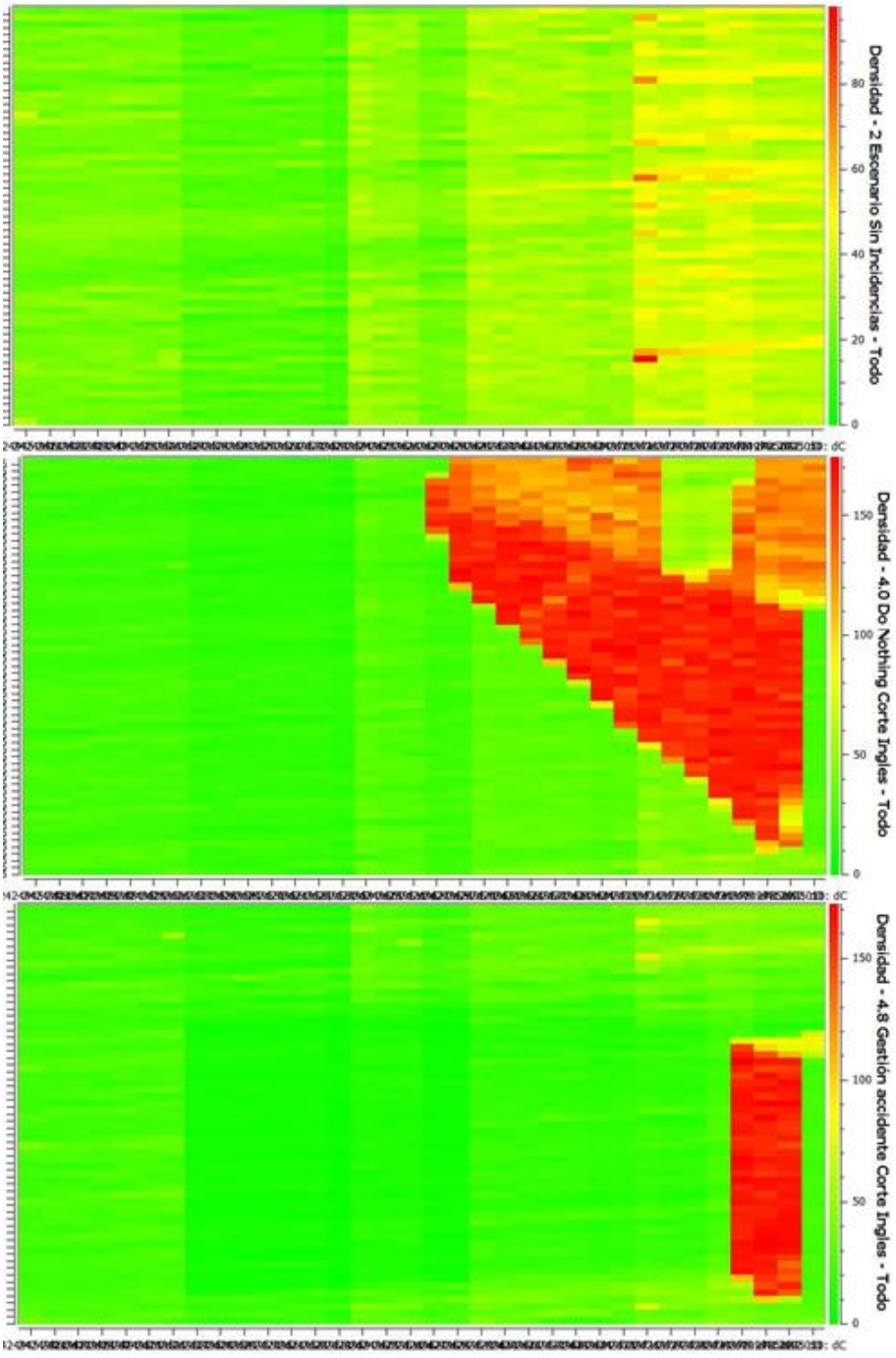


Figura 58: Diagramas espacio – tiempo de densidad para la zona del incidente Corte Inglés comparando escenario sin incidencias, do nothing y estrategia escogida.

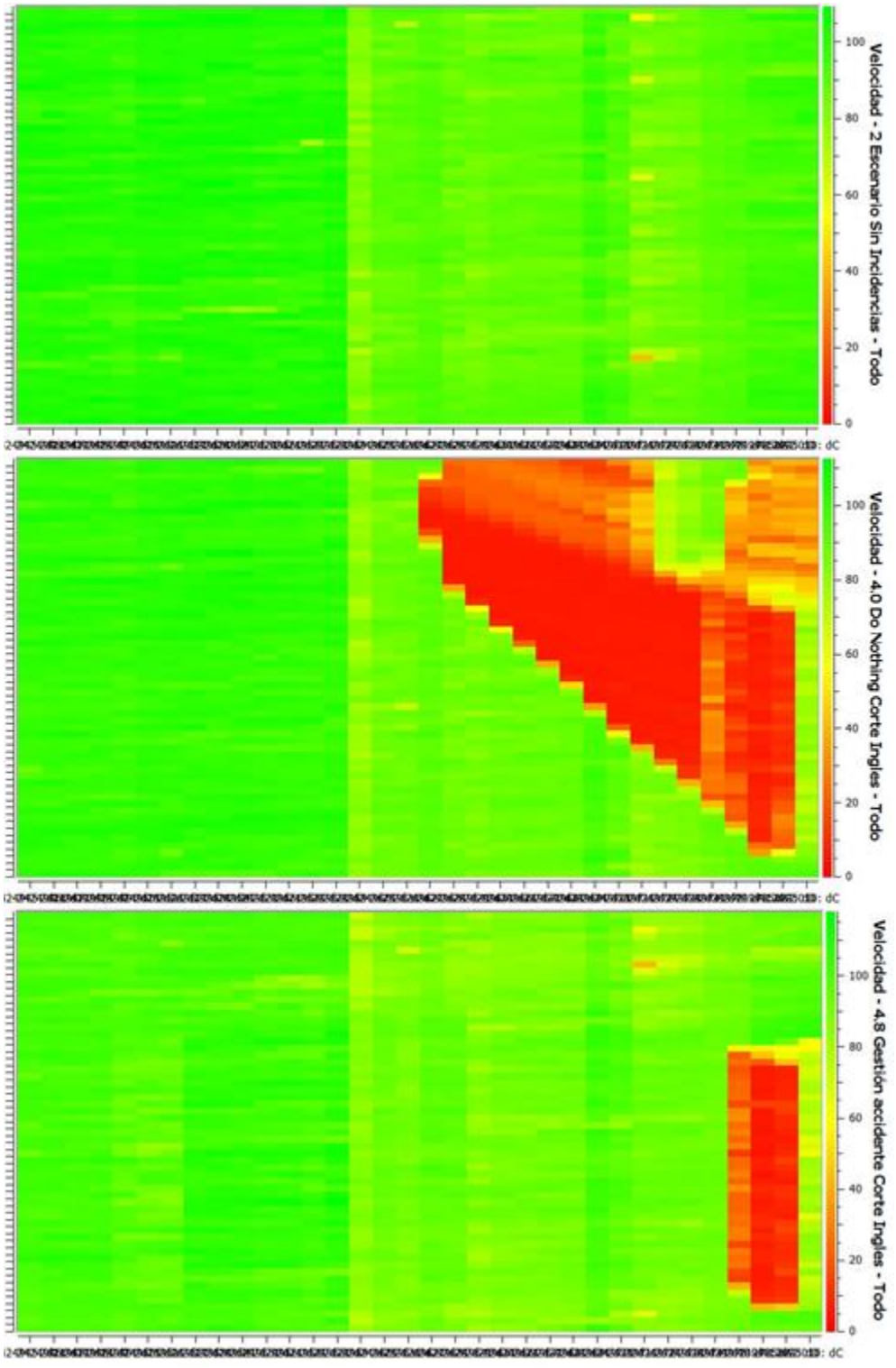


Figura 59: Diagramas espacio – tiempo de velocidad para la zona del incidente Corte Inglés comparando escenario sin incidencias, do nothing y estrategia escogida.

11 APLICACIÓN DE LAS ESTRATEGIAS. INFORMACIÓN AL USUARIO.

Para que las estrategias simuladas puedan implementarse es necesario informar a los usuarios de los desvíos de forma que ellos tomen las rutas adecuadas para generar un escenario que mejore el funcionamiento de la red. Para ello se usan los Paneles de Mensajería Variable (PMV o VMS en inglés), gracias a la categoría de prioridad que ostenta esa clase de señales según la legislación.

El Reglamento General de Circulación, aprobado por Real Decreto 1428/2003, contiene en su artículo 113 una singularidad normativa única en la Unión Europea ya que establece en segundo lugar de prioridad la señalización circunstancial que hoy se conoce como variable. Así pues, después de la señalización ordenada por los agentes de circulación, la correspondiente variable o circunstancial tiene prioridad sobre el resto de señalización, según el siguiente esquema:

1. Señales y órdenes de los agentes de circulación.
2. Señalización circunstancial que modifique el régimen normal de utilización de la vía y señales de balizamiento fijo.
3. Semáforos.
4. Señales verticales de circulación.
5. Marcas viales.

De esta manera, nuestro ordenamiento jurídico evita de un plumazo los enormes problemas que se encuentra la señalización circunstancial en otros estados miembros en los que, antes de “enviar a campo” cualquier señalización, se deben tener en cuenta las señales verticales fijas que pudieran entrar en contradicción con la señalización variable.

La Resolución de 1 de junio de 2009, de la Dirección General de Tráfico, por la que se aprueba el Manual de Señalización Variable establece el primer marco normativo que permite garantizar que esta prioridad se adecua a las situaciones viales. Lo que hace la citada Resolución es darle una vuelta a los procedimientos de entender la señalización. Si hasta su publicación, la taxonomíade la señalización variable se había realizado sobre las funciones del signo, a saber, preceptivos, de advertencia de peligro y de información, lo que hace la Resolución es reconstruir el esquema de señalización variable sobre las situaciones vialesque se afrontan desde los Centros de Gestión de Tráfico.

Ya el Reglamento General de Circulación estableció en el año 2003 un apartado especial "Paneles de Mensaje Variable" en su Anexo I en el que, respetando todavía los taxones principales por las funciones del signo, incorporaba unos de segundo nivel que entraban en esas situaciones viales: variaciones de la adherencia, en los niveles de tráfico, en la visibilidad, en el viento, en la capacidad de la vía y en el itinerario. Sin embargo, las investigaciones que por aquel entonces comenzó a liderar la Dirección General de Tráfico en el ámbit o internacional, tanto en el orden de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (Working Party 1 de la sección de Transportes) como en el de la Comisión Europea (Estudio Europeo Mare Nostrum EGS4 del programa Easwyay), no habían cosechado sus frutos y por tanto no parecía razonable incorporarlas al cuerpo normativo de un reglamento. Para el año 2009, el soporte de hecho y de derecho hizo posible que viera la luz la mencionada Resolución. (Arbaiza, 2011)

Criterios de diseño de los PMV

Para proponer un mensaje correctamente en un PMV es necesario tener en cuenta los criterios de diseño de estos sistemas de información. A continuación se exponen dichos criterios tal y como vienen en el *Tema 16: La señalización variable II. Criterios de diseño y uso de Mensajes en los paneles de mensaje variable. Aspectos Relacionados con la ubicación. El manual para operación de Centros de gestión de tráfico (Arbaiza, 2011).*

Los criterios de diseño y uso de mensajes se articulan alrededor de cinco criterios básicos, concretados en principios fundamentales y en sus consecuentes aspectos de señalización en los PMV, que unas veces implican obligación y, otras, prohibición. Éstos se detallan en las situaciones viales descritas en el punto 4.

Criterio 1: Aspectos previos a la utilización de los PMV

La opción encendido / apagado: una cuestión fundamental.

Los PMV sirven para informar sobre circunstancias inesperadas o cambiantes en el tráfico o la vía. Un PMV apagado infunde en el conductor la sensación de que, dentro del rango de informaciones que suelen dar estos dispositivos, no hay nada en el horizonte de su desplazamiento que deba preocuparlo.

Cuando hay muchos PMV encendidos exhibiendo información, la génesis y la posterior reducción de incertidumbre que experimenta el conductor puede efectuarse sin rastrear totalmente el contenido del mensaje en cuestión, es decir, de forma mecánica ("la congestión de siempre", "los tiempos de siempre"). Llegados a este punto, en términos sistémicos, la exhibición de información participa de cierto nivel de deterioro. Si previamente ha ocurrido que el conductor

ha superado ese problema sin adoptar medidas especialmente dramáticas, se co rre el riesgo de no prepararle adecuadamente cuando de verdad haga falta.

Principio 1. El PMV debe encenderse, única y exclusivamente, si hay que comunicar algo relevante al conductor.

Uso de mensajes de tráfico y mensajes no de tráfico.

En algunos casos, sin embargo, se ha considerado oportuno hacer que los PMV sirvan de soporte para informaciones relacionadas con campañas "genéricas" de seguridad vial, como si de otro medio de comunicación de masas se tratara.

Principio 2. Los "mensajes de tráfico" se exhibirán siempre con texto justificado a la izquierda junto a un pictograma; mientras que los "mensajes no de tráfico" se exhibirán siempre con texto centrado y sin pictograma.

Principio 3. Los "mensajes no de tráfico" se podrán exhibir, única y exclusivamente, si no hay un "mensaje de tráfico" que mostrar. Dich o de otra manera, los "mensajes de tráfico" son prioritarios frente a los "mensajes no de tráfico".

Figura 60: Diferencia entre mensaje de tráfico y mensaje no de tráfico.

Principio 4. La exhibición de los "mensajes no de tráfico" siemp re se producirá en los períodos de tráfico menos intensos y dentro de un marco temporal limitado, tanto en términos del día de exhibición (por ejemplo, dos horas), como en términos del período de exhibición (por ejemplo, dos semanas).

Principio 5. La exhibición de los mensajes no de tráfico siempre se producirá de forma vinculada a una campaña específica de seguridad vial, según la cual, este mensaje adquiere sentido y puede ser atendido previamente y de manera simultánea en otros medios (prensa, radio, televisi ón, carteles, etc.). Se conseguirá así un máximo reconocimiento del mensaje con un mín imo de interferencia.

El número de unidades de información por mensaje.

Un PMV podrá comunicar eficientemente un mensaje si este es legible, teniendo en cuenta tanto la distancia a la que se encuentra del conductor como el tiempo que éste tiene para leerlo. En principio, para conseguirlo, y asumiendo que las normas correspondientes han sido tenidas en cuenta por los fabricantes de paneles, el conductor tiene que tener una agudeza visual normal o corregida. El cumplimiento de tales requisitos permitirá responder a dos cuestiones fundamentales: la distancia de lectura que debe establecerse y el número de unidades de información que se leerán —a más unidades, más tiempo de lectura.

Evidentemente, este problema va directamente ligado a la velocidad de paso. Un conductor que viaja a 120 km/h cubre 33 metros por segundo. Con una agudeza visual estándar, es capaz de leer un PMV a unos 200 metros. A esta distancia hay que restar los últimos metros conforme se llega al panel, porque no puede asumirse que el conductor leerá levantando la vista más de 1 0-15 grados. En síntesis, queda una "ventana de lectura" de unos 165 metros, lo que equivale a entre 4,5 y 5 segundos para leer el PMV al menos dos veces. La cuestión es relacionar ese tiempo y el número de elementos de información. Esta relación suele expresarse con la siguiente fórmula simplificada n = 2 + n/3, donde t es el tiempo en segundos y n es el número de elementos de información que se tienen que leer. Una lectura de tres elementos de información requerirá unos 3 segundos (leyendo dos veces). Con una ventana de lectura de 5 segundos a 120 km/h, los mensajes deben ser forzosamente breves y fáciles. No es de extrañar que se aprecie cierto descenso de la velocidad de los conductores conforme se acercan a los paneles de mensaje variable, especialmente cuando llevan más texto. Un mensaje con seis unidades de información requiere, en principio, al menos 4 segundos según la fórmula expuesta.

Reducir a 100 km/h permite ganar un segundo, lo que significa poder leer más holgadamente el mensaje. Este tipo de respuestas –los conductores reducen la velocidad para leer mensajes largos-, son las que suelen ocurrir en el tráfico real y se debe ser consciente de ello.

Una cuestión importante es el concepto de "unidad de información". Se puede decir que estas unidades de información se componen de elementos informativos tales como pictogramas, topónimos, números, abreviaturas, descriptores, etc. Así pues, se define una unidad de información como la respuesta que obtenemos a una pregunta significativa para el conductor. Una unidad de información sería por ejemplo "mantenga distancia de seguridad", otra "re tenciones", otra "desvío recomendado", etc.

Principio 6. En un rango de entre 4 y 7 palabras junto al pictograma, con velocidades de paso de 120 km/h, se completa aproximadamente un cuadro de entre 2 y 4 unidades de información por mensaje. Estos parámetros no se deben superar salvo casos excepcionales, por

ejemplo, mensajes alternantes con velocidades de paso de 60 km/h debido a una congestión o una nevada en ciernes.

La necesidad de evitar la redundancia.

El conductor dispone de un tiempo limitado para aprehender el mensaje, lo que obliga a evitar los términos innecesarios y, especialmente, los redundantes. Por ello, prácticas como repetir el mismo pictograma dos vece s (en pórticos con doble pictograma), o repetir todo o parte del significado que ya transmite el pictograma con el texto, no son admisibles (por ejemplo, utilizar palabras como atención, peligro o precaución junto a un pictograma de advertencia de peligro). Si, como mínimo, el conductor debe tener la opción de leer el mensaje dos veces, se le debe facilitar esa labor. La única excepción a esta norma la constituye el uso de texto adicional como apoyo de ciertos pictogramas cuyo significado no queda del todo claro o que son de reciente incorporación — la ortopedia semántica.

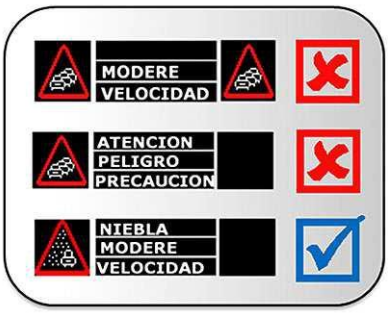


Figura 61: Evitar la redundancia en PMS.

Principio 7. A no ser que exista una indicación directa del Director del Centro de Gestión de Tráfico, se cumplirán las siguientes con diciones:

- No mostrar mensajes alternantes
- No superar el criterio de 7 palabras por aspecto
- No repetir en el texto, ni total ni parcialmente, lo que dice el pictograma (redundancia)

Principio 8. En aquellas comunidades autónomas con lenguas cooficiales, si se estima oportuno y de manera excepcional, se enviará n al PMV dos mensajes alternados: uno el incorporado en el anexo II; otro en la lengua cooficial. La traducción a la lengua cooficial será determinada por el Director del Centro de Gestión.

Principio 9. En los casos en lo que se decida enviar mensajes alternados en una de las lenguas de las oficiales de la Unión Europea, se enviarán al PMV dos mensajes alternados: uno el incorporado en el anexo II; otro en la lengua oficial de la Unión Europea. La traducción a la

lengua oficial de la Unión Europea será determinada por los Servicios Centrales de la Dirección General de Tráfico.

Criterio 2: Uso de los pictogramas en PMV

La elección del pictograma principal.

El pictograma es el principal elemento transmisor de la información pues sintetiza situaciones viales o de tráfico que son complejas, se lee por lo general a doble distancia que el texto y transmite, en potencia, un lenguaje universal. Hay que dar prioridad a los pictogramas que reflejan específicamente la situación frente a los más genéricos, porque un pictograma específico tras mite más información y necesita menos texto complementario para comunicar algo.

Principio 10. Se deberá dar prioridad a los pictogramas orientado s a consecuencias frente a los que informan sobre causas, porque los primeros muestran información más importante en el orden temporal de acciones que debe llevar a cabo el conductor y suelen ser los más específicos.

Figura 62: Elección del pictograma del VMS.

Reglas de ubicación de la información en PMV con doble pictograma.

Principio 11. Si a la izquierda hay un signo preceptivo, a la derecha puede haber un signo bien preceptivo, bien de advertencia de peligro, bien informativo. El signo presente en la izquierda –de obligación o de prohibición-, no será el mismo que el signo de la derecha (principio de no redundancia), aunque puede ser un signo de la misma función con contenido distinto.

Figura 63: Pictogramas disponibles cuando a la izquierda hay un signo preceptivo.

Principio 12. Si a la izquierda hay un signo de advertencia de peligro, a la derecha puede haber un signo bien de advertencia de peligro, bien informativo. El signo presente en la izquierda –de advertencia de peligro-, no será el mismo que el signo de la derecha (principio de no redundancia), aunque puede ser un signo de la misma función con contenido distinto.

Figura 64: Pictogramas disponibles cuando a la izquierda hay un signo de peligro.

Principio 13. Si a la izquierda hay un signo informativo, a la derecha sólo puede haber un signo informativo. El signo presente en la izquierda –informativo-, no será el mismo que el signo de la derecha (principio de no redundancia), aunque puede ser un signo de la misma función con contenido distinto.

Como en todo, hay alguna excepción y probablemente la más notable sea el signo de limitación de sobrepasar cierta distancia de seguridad. A menudo, este pictograma se emplaza a la derecha, no a la izquierda, acompañando al pictograma de peligro que queda en la izquierda (congestión, firme deslizante). En algunos casos, parece incluso recomendable hacerlo así (parece que se entiende mejor "hay una congestión de 4 km de extensión – controle la distancia de seguridad", que "hay que vigilar la distancia de seguridad durante 4 km – por causa de la congestión". En realidad, lo que esta situación indica es que este signo debe ser utilizado como una advertencia de peligro, o como una recomendación, con un uso informativo. Además, es difícil concretar la distancia aconsejab le (ver Criterio 5), y al conductor no le es fácil saber si mantiene una distancia de 6 0, 80 o 100 metros con el vehículo que va delante, aunque sí puede entender que debe extremar las precauciones en este sentido. En todo caso, estas consideraciones serán tomadas en cuenta y puestas en práctica sólo por indicación del Director del Centro de Gestión de Tráfico.

Incorporación de elementos pictográficos nuevos o rediseñados.

Uno de los problemas que encontramos en la gestión de los PMV es la falta de pictogramas para todas las situaciones requeridas. Esta problemática tiene mucho que ver con el escaso periodo de implantación y maduración de los signos variables, circunscrito a los últimos 20 años, si los comparamos con la mayoría de los signos 'estáticos' de tráfico, estandarizados entre 1909 y 1968. Los PMV ofrecen posibilidades de gestión y explotación que no habían sido planteadas con anterioridad (por ejemplo, redireccionar el tráfico durante 6 horas), y estas posibilidades requieren nuevos pictogramas. Cuando se plantea la necesidad de un nuevo signo de tráfico, se distinguen dos opciones: la innovación total y una suerte de sincretismo gráfico (condensación). Esta última opción fue ya tomada en la Convención de Viena de Señales y Signos de 1968 (por tanto en el Reglamento General de Circulación), y se ha materializado en técnicas de adición y de traslación.

Figura 65: Técnicas de adición y de traslación.

Principio 14. Se incorporan nuevos signos (obtenidos por traslación de la señalización de peligro), para la señalización variable de circunstancias equivalentes pero no peligrosas a corto plazo.

Figura 66: Traslación de los pictogramas en casos de lejanía de peligro.

Principio 15. Arcén viable. Se incorporan nuevos signos obtenidos por adición referentes a la viabilidad del arcén, desglosados en tres elementos gráficos: a) arcén disponible o viable, b) arcén viable que va a dejar de serlo, c) arcén no disponible o no viable.

Figura 67: Signos nuevos de uso de arcén.

Principio 16. Corte de carretera. Se incorpora un conjunto de signos para la indicación de corte de carretera (sin salida, con salida o en la salida) construyendo las señales por derivación de signos básicos de carril y la señal de circulación prohibida.

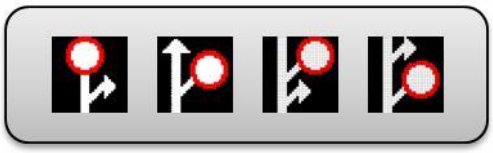


Figura 68: Signos nuevos de corte de carretera.

Principio 17. Retenciones. Se establece la opción "a" para indicar "congestión en vía troncal, salida alternativa", o para señalar "salida congestionada, alternativa vía troncal". La opción "b" desarrolla los mismos conceptos, pero para el caso en que la retención se encuentre relativamente alejada del PMV.

Figura 69: Signos nuevos de retenciones.

Principio 18. Colores de la nieve. Se establecen cuatro niveles de circulación asociados a estados de la calzada por la presencia de nieve.

Verde. Significa prudencia. Comienza a nevar. Aunque la circulación no se ve afectada, conviene mostrarse prudente. Se recomienda no sobrepasar la velocidad de 100 km/h en autopistas y autovías, y de 80 km/h en el resto de carreteras. Los camiones deben circular por el carril derecho y no pueden adelantar.

Amarillo. Significa precaución. La calzada empieza a cubrirse de nieve. En este nivel no se permite circular a los camiones y vehículos articulados. Los turismos y autobuses no deberían rebasar la velocidad de 60 km/h.

Rojo. Significa circulación muy difícil. La calzada se encuentra completamente cubierta de nieve. En esta situación, la circulación sólo es posible haciendo uso de las cadenas u otros dispositivos autorizados. La velocidad a la que, como máximo, se recomienda circular es de 30 km/h. No se permite la circulación de autobuses, camiones y vehículos articulados.

Negro. Significa que la carretera está intransitable para cualquier tipo de vehículo y existe un claro riesgo de quedar inmovilizado por períodos prolongados de tiempo.

Figura 70: Riesgo de nieve.

Principio 19. Lluvia. Se traslada el panel complementario S-890 para indicar en los PMV la presencia de lluvia.

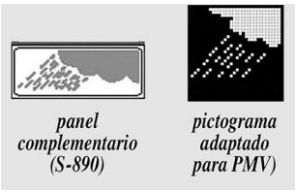


Figura 71: Cambio de signo para aviso de lluvia.

Criterio 3: Uso de los elementos alfanuméricos en PMV

Principio 20. La organización de los contenidos en la zona del alfanumérico.

Como premisa, se debe respetar el principio fundamental de que cada tipo de información ocupa su propia línea: primera, para la información adicional sobre la naturaleza del evento; segunda, para la información relativa a la distancia y/o extensión, y, tercera, para causas o consejos adicionales. Para la organización de los contenidos en la zona alfanumérica, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Es inevitable *flexibilizar el criterio de la ubicación* de la información según su clase, aunque dentro *de un orden fijo*. La información se emplazará según su tipo en este orden: naturaleza del evento – localización – consejo – causa. La asignación final de espacios dependerá de las necesidades y las posibilidades según el tipo de PMV.
2. Es conveniente distinguir entre *causas simultáneas o consustanciales al evento principal* (casi siempre eventos meteorológicos o circunstanciales que afectan directamente la visibilidad y la adherencia de la vía), y *causas consecutivas al evento principal* (cuyo emplazamiento difiere de la localización del evento que anteceden). Las causas simultáneas (nieve, lluvia, hielo, humo, etc.), se entienden como naturaleza del evento y se ubican en la primera línea del PMV, a continuación del pictograma que matizan. Las causas consecutivas (accidente, obras, cortes de vía, etc.), van en la tercera línea del PMV, o en el segundo pictograma en PMV con dos pictogramas.

3. Conviene categorizar la *extensión*, en particular la extensión cuantitativa, como información *relativa a la naturaleza del evento* y no independiente de éste (como pueda serlo la distancia). Su ubicación preferente será la primera línea del PMV.

Principio 21. Abreviaturas, elementos alfanuméricos abstractos y etiquetas verbales. Las abreviaturas estandarizadas internacionalmente o indicadas por la Real Academia Española, se incorporarán en los PMV sólo y exclusivamente para los siguientes casos:

Tabla 13: Abreviaturas para PMS.

Concepto	Abreviatura
Kilómetro/s	km
Metro/s	m
Minuto/s	min
Tonelada/s	t
Kilogramo/s	Kg (KG)
Puente	PTE.
Salida	S.
Dirección	DIR.
Ayuntamiento	AYTO.
Carretera	CTRA.
Avenida	AVDA.
Calle	C.
Ciudad	CDAD.
Derecho / Derecha	DCHO. / DCHA.
Izquierdo / Izquierda	IZDO. / IZDA.
Norte, Sur, Este, Oeste	N, S, E, O

Principio 22. Extensión cuantitativa de un evento. Para dar a entender la extensión del evento indicado en el pictograma de manera cuantitativa, se utilizará el signo "=" en la primera línea de la zona alfanumérica junto al número correspondiente de kilómetros.

Principio 23. Extensión cualitativa de un evento. Para significar la extensión del evento indicado en el pictograma de manera cualitativa, se indicarán las dos localizaciones geográficas: En la segunda línea de la zona alfanumérica la localización geográfica donde comienza el evento; en la tercera línea de la zona alfanumérica, la localización geográfica donde termina el evento.

Principio 24. Indicación general de la extensión de un evento. Para comunicar la extensión del evento indicado en el pictograma de forma cuantitativa, se utilizará el signo " ", que separará el origen y el final del mismo expresado en los kilómetros de la vía.

Principio 25. El signo de salida de vía llevado al alfanumérico. Allá donde la tecnología del PMV lo permita, se deberá ir introduciendo paulatinamente el símbolo S-341; S-342 para indicar "Salida".

Concepto	Alfanumérico abstracto	Idea en PMV
Igual	=	
Entre	(A) → (B)	
Salida		

Figura 72: Signo alfanumérico de salida.

Criterio 4: Estrategias de localización de los eventos viales

Uno de los aspectos que más preocupa a los gestores del tráfico y a los operadores de mensajería variable, es el de la proximidad al PMV de ciertos eventos peligrosos en el tráfico. El conductor tiene un margen limitad o de reacción y de acomodación a la situación, especialmente en vías de alta velocidad. Frente a la omnipresencia de los signos estáticos en la red viaria, en una relación figura-fondo en el contexto del tráfico, los PMV son más ilustrativos y salientes que los signos estáticos, captan más la atención, lo que refuerza su capacidad de influencia. Pero el problema no es la identificación de una información importante, sino la dimensión espacio-temporal: cuándo se arriba a un evento, cuánto tiempo se retiene la información, cuánto tiempo se mantiene una alerta vigilante. Por otra parte, los PMV son instrumentos más flexibles que los signos estáticos de tráfico, pero también más problemáticos.

Frente al ámbito ampliamente estructurado de los signos estáticos, nunca sabemos qué peligro específico vamos a tener que anunciar en un PMV. Frente a un rango relativamente estrecho en la distancia entre el signo y el evento (150-250 m para advertencia de peligro; 500-1000m para avisos direccionales, etc.), la distancia del panel al evento peligroso nunca está determinada de antemano en los PMV. Esta cuestión nunca ha sido vista como un problema, más bien se ha notado su efecto ventajoso, "podemos anunciar un peligro por congestión a 15 kilómetros". Sin embargo, recorrer 15 kilómetros a 120 km/h cuesta unos 8 minutos, lo cual cuadruplica el estándar asimilado por el conductor de lo inminente y lo inmediato, construido a partir de la experiencia con las señales estáticas.

minutos	1	2	3	4	5	6	7	8
metros	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000

Figura 73: Relación de tiempo y distancia a velocidad de autovía.

En la práctica, la solución a esta cuestión pasa por asumir que los avisos de peligro deben encontrarse relativamente cerca de los PMV y, consecuentemente, también pasa por adoptar varias normas para el uso de los PMV que *advierten de un peligro*.

Los mensajes que advierten del peligro hacen valer el triángulo rojo, pues facilitan información en caliente. Su objetivo es la seguridad vial, desencadenar una acción preventiva. Como el peligro está lo suficientemente cerca como para mantener la atención hasta encontrarlo, no es necesario indicar la distancia. El consejo 'modere velocidad' refuerza la idea de lo inminente e inmediato.

Los mensajes que informan del peligro no incorporan el triángulo rojo, pues la información se facilita en frío. El objetivo contempla distintos parámetros: confort, eficiencia, movilidad (posibles re-encaminamientos), y seguridad vial. Por eso, es importante indicar una distancia que proporcione al conductor el margen de actuación suficiente para las distintas acciones posibles. Una distancia mayor del panel al evento (10 km, 20 km…), permite un margen más amplio de acciones.

Así pues, conviene distinguir entre *advertencia del peligro* e *información sobre un peligro, tanto* en su forma, como en su tratamiento y función. Esta distinción tiene por objeto proporcionar al conductor claves para descifrar qué mensajes requieren una atención especial, directa e insoslayable y qué mensajes requieren una mera toma de conciencia de una situación que puede o no aplicarse en su caso. El conductor puede así determinar, en el primer caso, que debe prepararse para afrontar una situación incierta y, en el segundo, que bien tendrá que afrontar ese evento en el medio plazo, o que tal vez pueda hacer algo para soslayarlo. Para distinguir ambos tipos de eventos, hay que proporcionar al conductor elementos de categorización, características que le permitan determinar que una información exhibida pertenece a uno u otro conjunto. En el Manual se proponen dos características para resolver el problema: la primera, mediante la representación pictórica del peligro (con o sin triángulo rojo); la segunda, gracias a la indicación de la distancia al evento (ausente o presente).

Principio 26. Limitar el margen de anticipación. Se utilizará la advertencia de peligro en PMV (triángulo rojo), únicamente cuando los eventos peligrosos se encuentren cerca. En términos operativos, se entiende que cerca, con un flujo de tráfico de 120 km/h es el equivalente a entre 0 y 4 kilómetros, o a entre 0 y 2 minutos.

Principio 27. No especificar la distancia en el panel antes de eventos cercanos. No se debe dar al conductor la oportunidad de relativizar si 500 m o 2 km significa cerca o lejos. Hay que habituarlo a tomar medidas en cuanto perciba el pictograma de advertencia de peligro (que

modere su velocidad, que incremente y mantenga su atención, que esté más alerta), porque entienda que encontrará el peligro en breve, cerca, aunque de forma inespecífica.

Principio 28. Distender el margen de anticipación. Se utilizará la estrategia de informar –en lugar de la de advertir-, sobre un peligro en PMV, únicamente cuando los eventos peligrosos se en cuentren relativamente lejos. Este rango se encuentra, con flujo de tráfico de 12 0 km/h a partir de unos 5 kilómetros o 3 minutos . Naturalmente, hay un margen de asignación de lo cercano y lo lejano en tiempo y recorrido a discreción de los Directores de los Centros de Gestión de Tráfico.

Principio 29. Indicar la distancia en el panel antes de eventos lejanos. La distancia a los eventos lejanos se indicará en e l PMV, en el formato que sea posible (distancia numérica, cualitativa).

Principio 30. Presentar el peligro lejano sin marco triangular rojo. Se presentará la información sobre un peligro aún lejano eliminando el marco triangular rojo.

Principio 31. Cercanía o lejanía de los eventos meteorológicos: una excepción a tener en cuenta. Para los casos de meteorología adversa, la distancia de peligro cercano se duplicará (10 km) y los eventos lejanos pasarán a ser los que se hallen a más de 10 km.

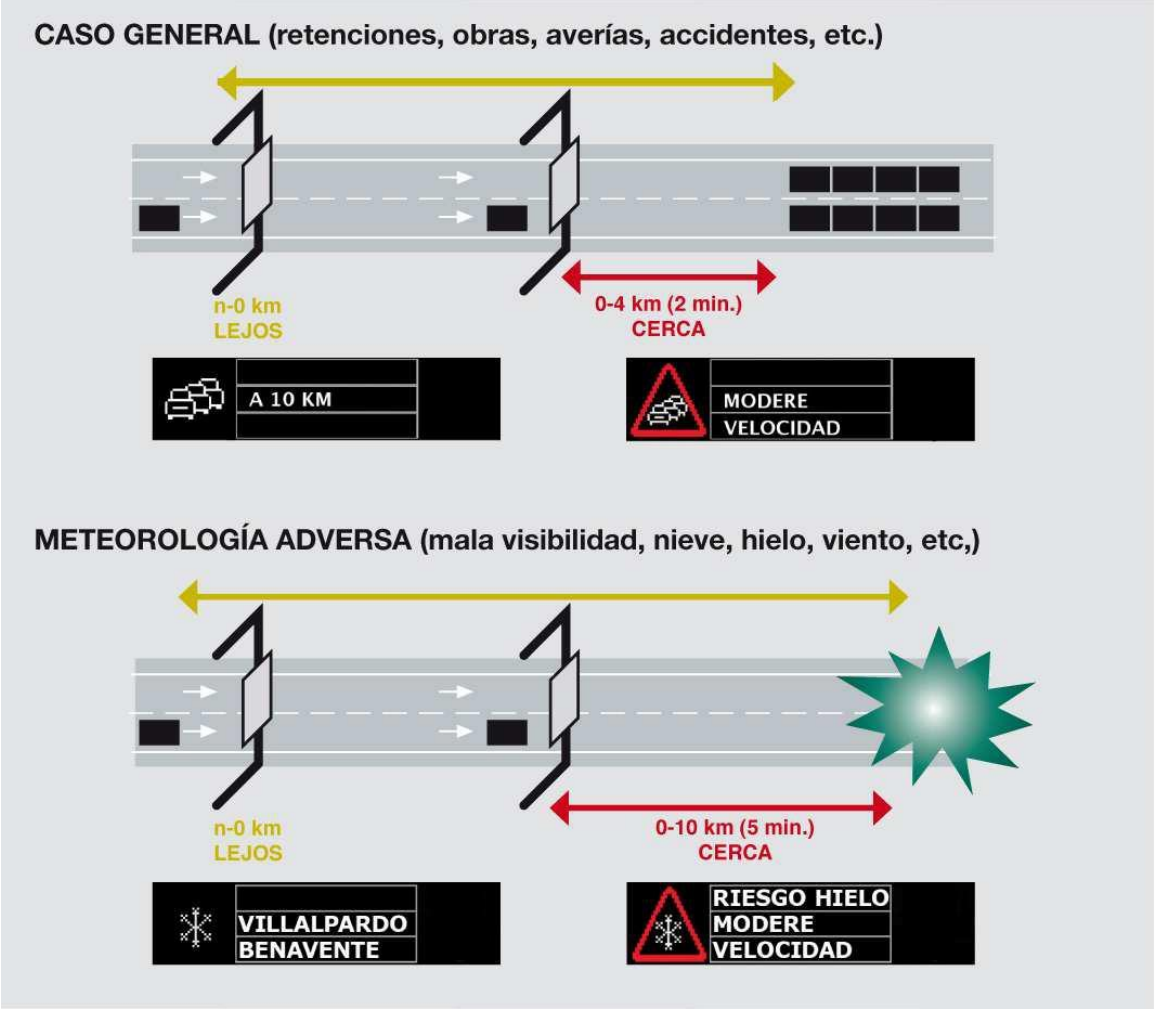


Figura 74: Modificación de los umbrales de cercanía de peligro en caso de meteorología adversa.

Criterio 5: Utilización de mensajes preceptivos.

La función preceptiva, obligar y prohibir, tiene normalmente una mala acogida entre los conductores. Se trata de una función que viene a anunciar restricciones y a cambiar planes y expectativas que cada cual asumía en su desplazamiento (velocidad de circulación, maniobras, direcciones, etc.), aunque cabalmente pueda entenderse su necesidad. Por tanto, cuando el gestor considere esta opción, debe saber a lo que se enfrenta y asegurarse de que se cumplen una serie de condiciones y se conocen una serie de parámetros. En este sentido, se contemplarán normas de adecuación funcional, de cuantificación y de vigilancia y sanción.

Principio 32. Adecuación funcional de la función preceptiva. Antes de recurrir a la función preceptiva en los PMV, habrá que asegurarse de que, efectivamente *esa prohibición u obligación específica es la soluc ión* a la situación vial o de tráfico.

Principio 33. Cuantificación de la función preceptiva. Tras cumplirse la norma anterior, el segundo paso consistirá en cerciorarse de que se pueden establecer con claridad los términos de prohibición o limitación, en sus magnitudes específicas (momento, lugar, distancia, extensión, etc.). En definitiva, si la adecuación funcional determina que prohibir es oportuno, la cuantificación determina si se pueden establecer los niveles específicos de esta prohibición. Son dos normas de coherencia.

Principio 34. Vigilancia y apoyo sancionador. Se debe determinar la posibilidad razonable de realizar la oportuna vigilancia y sanción de las antijuridicidades derivadas del incumplimiento de la señalización circunstancial. La efectividad operativa sancionadora determina la capacidad para gestionar de forma eficiente y creíble una obligación o una limitación.

Si las tres normas —adecuación, cuantificación, vigilancia— se cumplen, sin duda será adecuado que la señalización circunstancial exhiba mensajes preceptivos. De no ser así, se optará por advertir del peligro, para que sea el conductor quien se autorregule (si estima justificado el aviso y entiende el peligro se autorregulará), o se optará, simplemente, por recomendar, para que el conductor decida si acepta y sigue el consejo.

Entre los aspectos a tener en cuenta para la situación de los paneles de mensaje variable se contemplan variables como:

- El perfil longitudinal y transversal de la vía.

- La naturaleza de las situaciones viales a resolver con el equipo (generales o específicas como pueden ser reencaminamientos de tráfico o acceso a carriles reversibles, VAO, etc.).
- La existencia de señalización vertical fija.
- Cuestiones relativas a la visibilidad y legibilidad.
- Los parámetros de tráfico de la vía.
- La orientación y demás condiciones geométricas en la sección de la vía.
- Las prestaciones eléctricas y de accesibilidad.
- Los estudios de tráfico, de entorno y de planificación.

Diseño de mensajes y colocación de los paneles

Siguiendo los criterios de diseño anteriormente mencionados, se ha diseñado un sistema de paneles con unos mensajes determinados para tratar de transmitir a los usuarios la necesidad de escoger las rutas que han sido obtenidas con la microsimulación.

Los paneles se han basado en la siguiente configuración para paneles mixtos (PMV-LPT1):

- Una o dos zonas gráficas de 64x64 ó 32x32 píxeles full colorRGB, con integración de textos.
- Tres líneas de texto de 12 caracteres de 16x11 ó 7x5 píxeles.
- Tamaño exterior para 2 zonas gráficas y 3 líneas de caracteres de 7186x1940 mm.

A continuación se exponen los mensajes que se han diseñado y la ubicación preliminar de los paneles para cada una de las estrategias propuestas.

Estrategia PCTCAN

La estrategia PCTCAN, como se ha explicado antes, pasa por desviar alrededor del 70% del tráfico que viene de la A-67 y va a la S-20 para llegar al centro de Santander, y conseguir que vayan por la A-67 hasta llegar a la S-10. Para ello, se ha diseñado el siguiente mensaje para mostrarlo en un panel situado con anterioridad al giro en el que se toma la S-20 o la A-67. El panel propuesto se ha denominado PMV 1. El mensaje cuenta con el pictograma de “obstrucción de calzada” e insta a los conductores que vayan al centro de Santander a coger la A-67 y la S-10.

Figura 75: PMV 1 propuesto para redireccionar el tráfico por la A-67 en la estrategia PCTCAN.

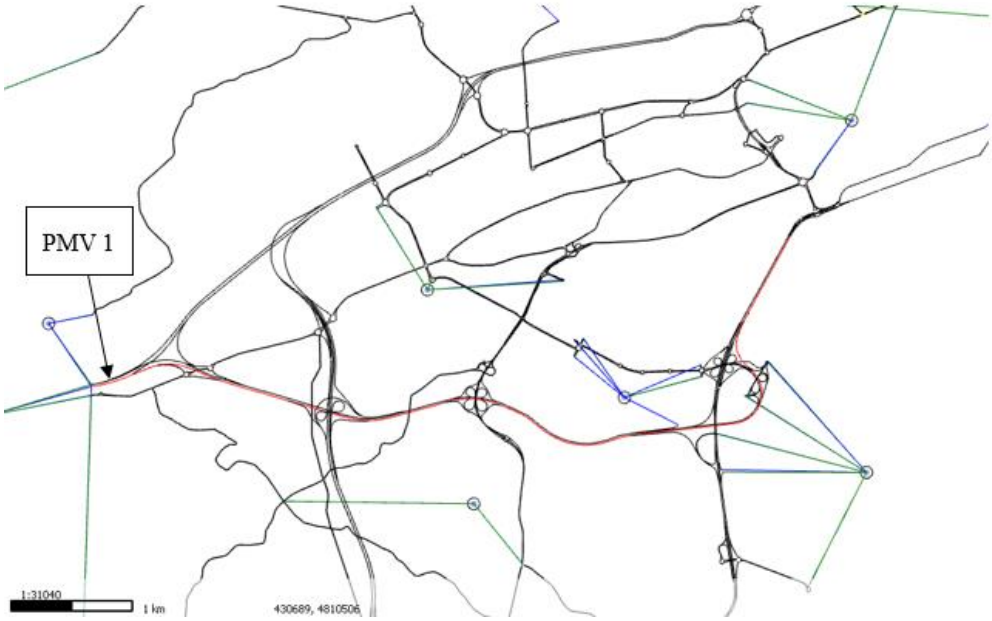


Figura 76: Ubicación del PMV 1, aguas arriba de la salida en la que se desvían los coches.

Estrategia Corte Inglés

En este caso, Existen cuatro rutas que deben ser seguidas por los conductores. Los paneles diseñados para esta estrategia son:

Desvío de Maliaño: Para el desvío de Maliaño se sitúa un panel en la avenida de la Concordia en la que se les dice a los conductores que den la vuelta y vayan por la N-623, a través del PMV2.

Figura 77: PMV 2 para informar a los conductores de Maliaño de que tienen que ir por la CA-140 en la estrategia CI.

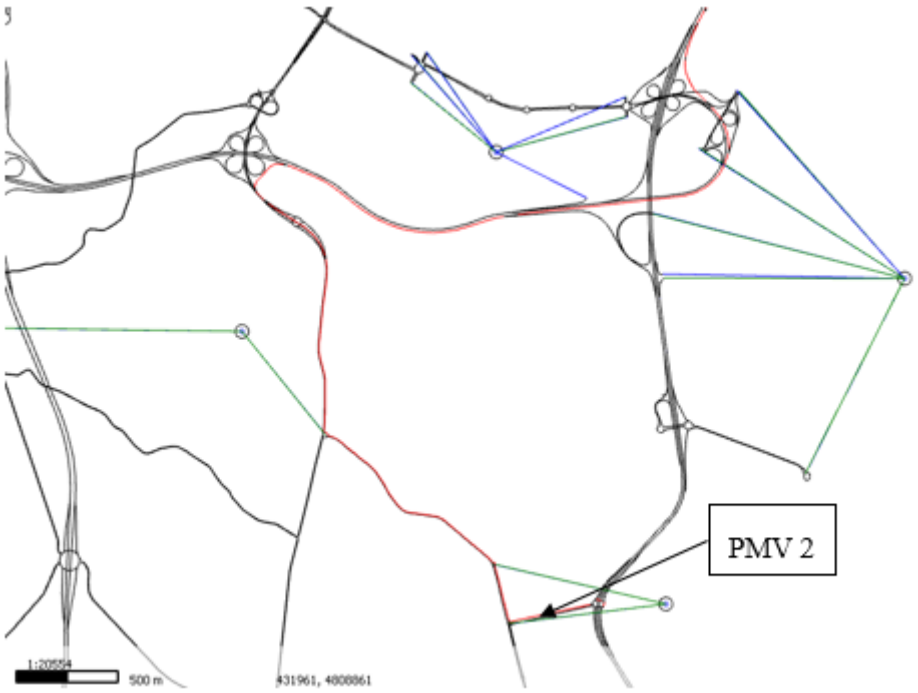


Figura 78: Ubicación del PMV 2.

Desvío de Bilbao: El desvío de Bilbao comprende dos desvíos que tendrán que diferenciarse. Al principio tienen un PMV común, y luego dos PMVs, uno para cada ruta.

Figura 79: PMV 3 para redirigir a los usuarios que vienen de Bilbao a la S-30.

Después, antes de la A-67, es necesario colocar dos paneles para informar a los usuarios de que tienen que coger salidas distintas según vayan al centro o a Santander. Estos paneles son el PMV 4a y el PMV 4b. Otra posibilidad es colocar un solo panel y alternar las dos salidas en el tiempo para los conductores de Bilbao a Santander, en general. Los vehículos del desvío hacia el Este necesitan el PMV 5 para redirigirse por la N-623.

Figura 80: PMV 4a para los usuarios del desvío S-10 hacia Santander centro.

Figura 81: PMV 4b para los usuarios del desvío S-10 hacia el sur de Santander.

Figura 82: PMV 5 para los usuarios del desvío S-10 hacia el centro.

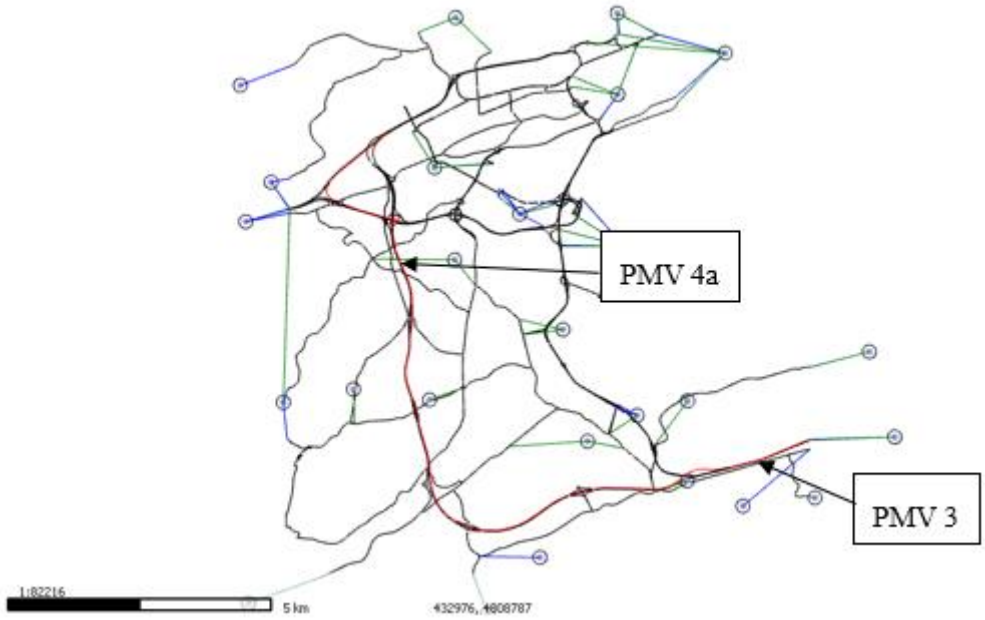


Figura 83: Ubicación de los PMVs para el desvío de Bilbao al centro de Santander.

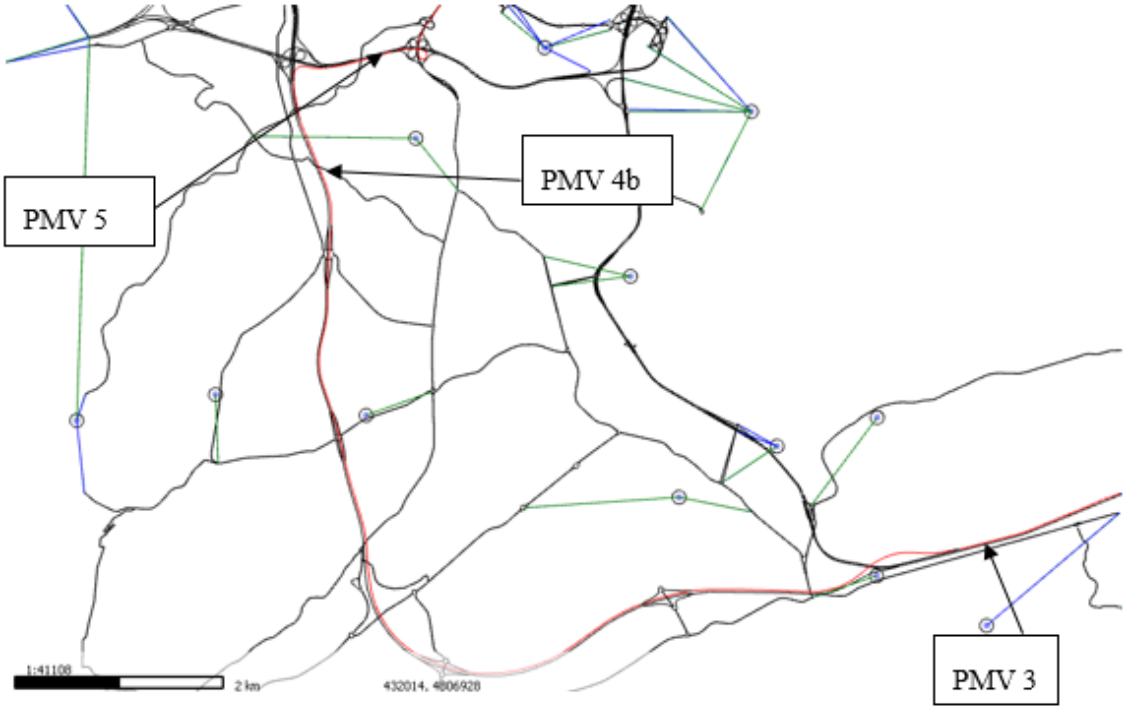


Figura 84: Ubicación de los PMVs del desvío de Bilbao hacia el Sur de Santander.

Desvío de Somo: Finalmente, es necesario definir los PMVs para desviar los coches que desde Somo – Pedreña accederían a la S-10, para que vayan por la ruta establecida para ellos. Para ello se colocará un PMV que les inste a ir hacia la N-635 y la S-30, a través de los paneles PMV 6 y PMV 7. El primer panel es para llevarlos a la S-30, y el segundo es para que continúen por ella hasta llegar a Santander.

Figura 85: PMV 6 para desviar el tráfico de Somo hacia la S-30.

Figura 86: PMV 7 para mantener a los vehícuos desviados de Somo en la S-30, y que no cojan las salidas destinadas a otros desvíos.

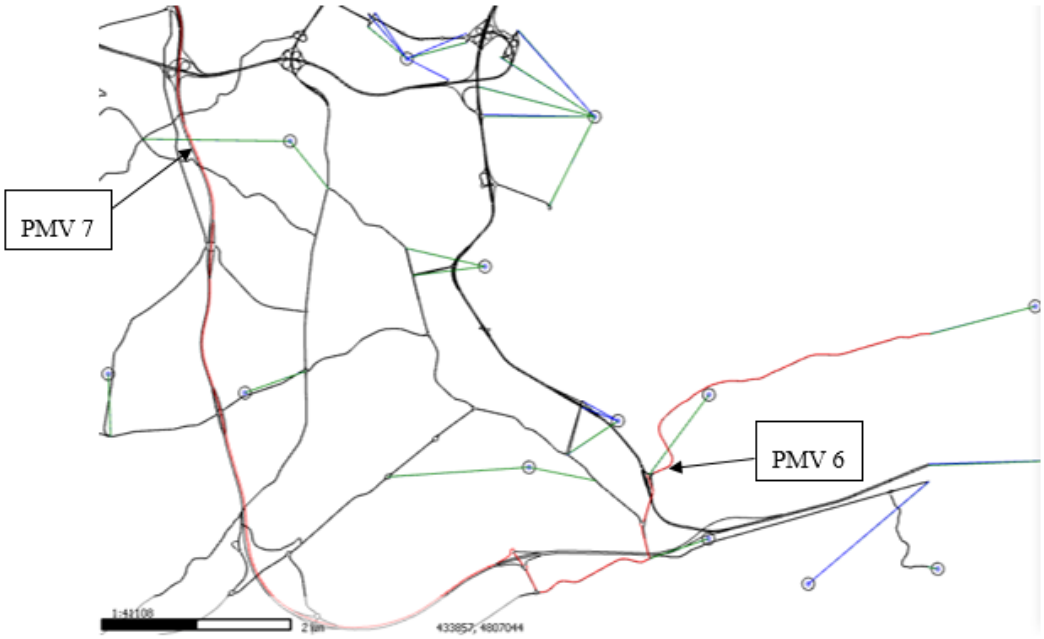


Figura 87: Ubicación de los PMVs para el desvío de Somo hacia Santander por la S-30.

12 CONCLUSIONES

En la actualidad, la gestión de tráfico se ha vuelto un recurso fundamental para mejorar el funcionamiento y solucionar los problemas a los que se enfrentan las redes viales de las grandes ciudades. En este sentido, destaca la importancia de solucionar los problemas de congestión no recurrente derivados de la ocurrencia de una incidencia imprevista en la red.

Con este fin, se ha diseñado un sistema de gestión del tráfico ante incidencias basado en los siguientes puntos:

- Un sistema de comprobación ininterrumpido del estado de la red con un algoritmo de detección de incidencias.
- Un proceso de toma de decisiones basado en la microsimulación de incidencias características de la red, en tiempo real o no.
- Una búsqueda de estrategias eficaces para mitigar la congestión a través de la microsimulación.
- Un sistema de información al usuario que emplea una red de PMVs para que las rutas teóricas que se han concretado puedan ser seguidas por los conductores.

Finalmente, se ha desarrollado una aplicación del sistema para la gestión del tráfico en los accesos de la ciudad de Santander, para lo cual:

- Se ha modelizado la red y la demanda en el programa TSS Aimsun. El escenario escogido es la hora punta de un día laborable en invierno, de las 8:00 a.m. a las 9:00 p.m. La demanda se ha extraído de los valores de los detectores registrados en el Mapa de Tráfico 2014 del ministerio de Fomento.
- Se han modelizado dos incidencias características en dos escenarios independientes, una en la S-20 cerca del PCTCAN y otra en la S-10 en el corte inglés.
- Se ha obtenido una estrategia eficaz para cada caso, comparando con el escenario sin incidencias y el *Do Nothing* en cada caso.
- En el primer caso se ha conseguido evitar prácticamente la congestión, aumentando en 50 horas el coste de la red con respecto al escenario sin incidencias.
- En el segundo caso se consigue minimizar la congestión de una forma muy apreciable, desviando tres flujos distintos de tráfico para que no colapsen la S-10 así como ningún punto de la red.

- En ambos casos se mejora el nivel de servicio de la red, el coste y el funcionamiento general, estando la red recuperada al final de la simulación.
- Tras ello, se ha propuesto una red de PMS con unos mensajes determinados asociados a las estrategias adoptadas respetando los criterios de diseño de este tipo de señalización.

Hay que tener en cuenta, que las simulaciones con las que se han obtenido estas estrategias se han basado en una tolerancia al guiado de los vehículos inferior al 100%.

En la práctica, el sistema debe estar acompañado de una adecuada monitorización que permita adaptar el sistema de información a los conductores al comportamiento real de los usuarios de la red, en el caso en los que los usuarios no sigan las indicaciones de la forma esperada.

También se recomienda el diseño de un sistema de detección de incidencias adaptado al Centro de Control de Tráfico de Santander, ya que el empleado en el estudio era una versión simplificada para que la simulación fuera viable y realista.

El sistema permite la aplicación de estrategias de redireccionamiento distintas a las obtenidas en la aplicación al caso de Santander. No obstante, cualquier modificación de las rutas deberá tener en cuenta el riesgo existente de que los vehículos congestionen otros puntos de la red. Es altamente recomendado el uso de microsimulación (en tiempo real o no) para descartar el uso de alternativas con efectos adversos.

En cualquier caso, puede concluirse que es posible diseñar sistemas de gestión eficaces para mejorar significativamente el funcionamiento de una red ante eventos de congestión no recurrente a un coste insignificante en comparación con el impacto económico y ambiental que es evitado con una estrategia adecuada, empleando los recursos que se han descrito en el presente estudio.

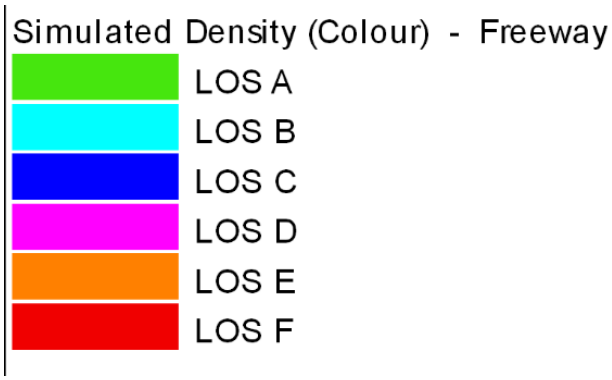
13 Bibliografía

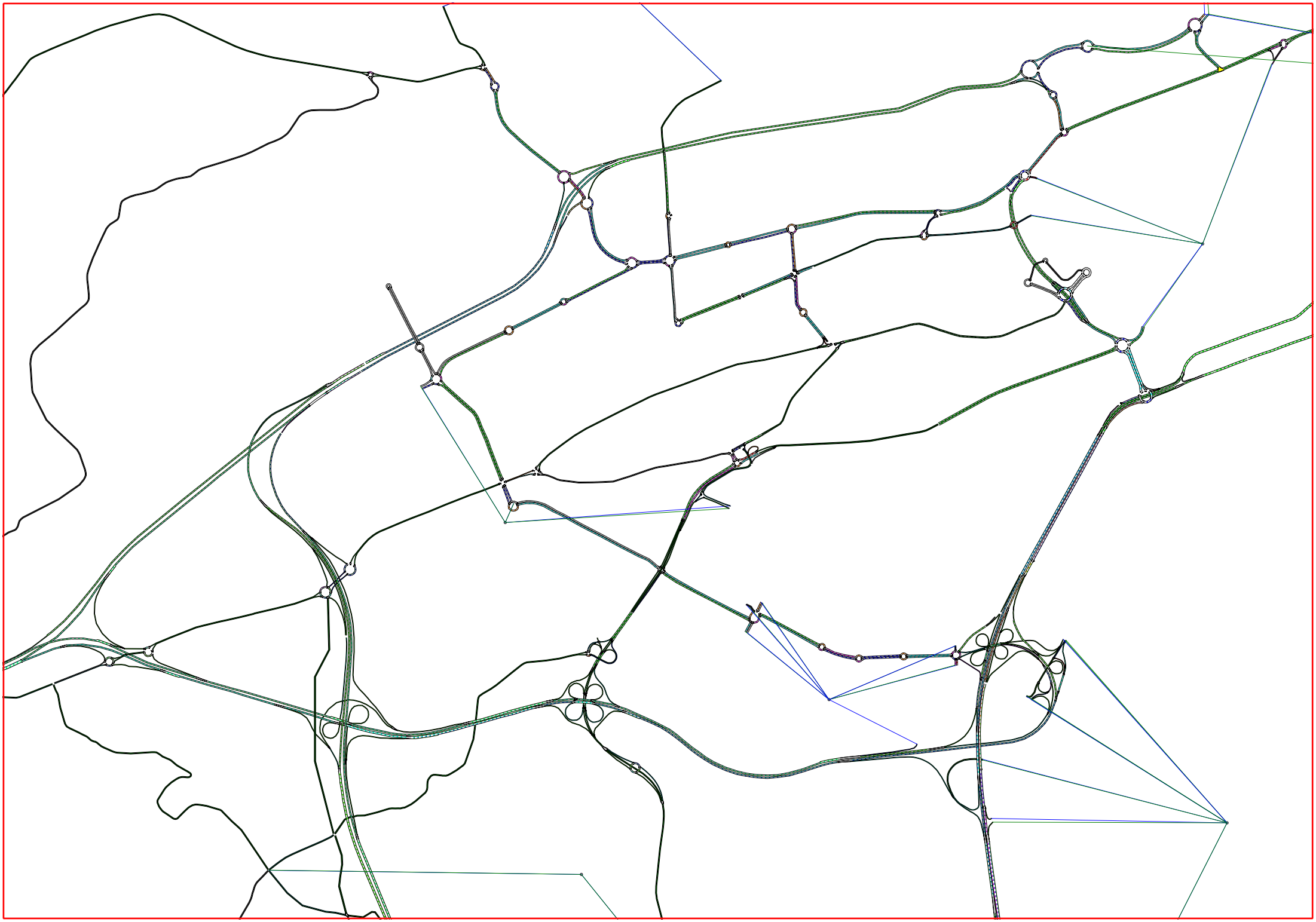
1. Lapuerta M. Regulación del tráfico mediante señalización de velocidad variable: aplicación al acceso por la autovía S-20 en Santander. Universidad de Cantabria. 2015.
2. Mirshahi M., Obenberger J., Fuhs C.A., Howard C.E.,. Krammes R.A., Kuhn B.T., Robin M. Mayhew R.M., Moore M.A., Sahebjam K., Stone C.J., Yung J.L. Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management. Federal Highway Administration 2007 FHWA-PL-07-012.
3. PB Farradyne. Traffic incident management handbook. Federal Highway Administration. 2000.
4. Appelqvist, I., Örngren, S. Rerouting of road traffic: A comparison of different rerouting alternatives at unplanned disruptions in road traffic. Chalmers university of technology 2014
5. Kimley-Horn of Michigan. Inc, Best practices for emergency rerouting. MDOT, 2011.
6. Geroliminis N.,Daganzo C. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. Transportation Research Part B: Methodological. 2008;42(9):759-770.
7. Dunn Engineeing Asociates, Siemens Intelligent Transportation Systems. Traffic control system handbook. Federal Highway administration. 2005.
8. Parkany E. A Complete Review of Incident Detection Algorithms & Their Deployment: What Works and What Doesn't. The New England Transportation Consortium 2005 NETCR37 Project No. 00-7
9. Weil R, Wootton J, García-Ortiz A. Traffic incident detection: Sensors and algorithms. Mathematical and Computer Modelling. 1998;27(9-11):257-291.
10. Petty K, Ostland M, Kwon J, Rice J, Bickel P. A new methodology for evaluating incident detection algorithms. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2002;10(3):189-204.
11. Mahmassani, H.S., Haas, C., Zhou, S. and Peterman, J. Evaluation of incident detection methodologies. Research Report 1795-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin, TX, October 1998, Revised October 1999.
12. Weil R, Wootton J, García-Ortiz A. Traffic incident detection: Sensors and algorithms. Mathematical and Computer Modelling. 1998;27(9-11):257-291.
13. Ching-Ping E, Kolb S, Park B, Kenneth K, Urbanik T. San Antonio Incident Detection Algorithm Study. Texas Transportation Institute. 1996. FHWA/TX-97/2917-1F

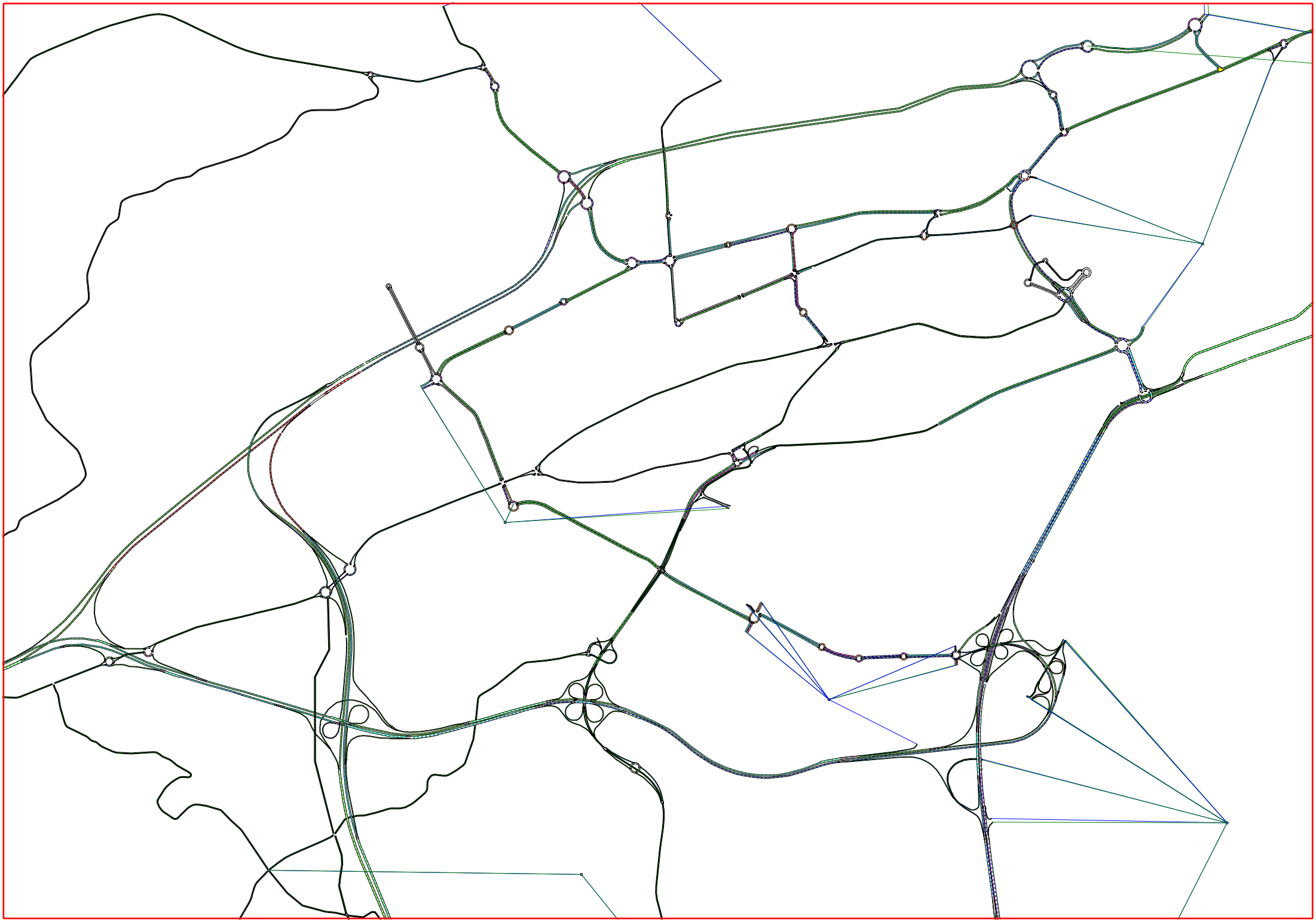
14. Asakura Y, Kusakabe T, Long N, Ushiki T. Incident Detection Methods Using Probe Vehicles with On-board GPS Equipment. Transportation Research Procedia. 2015;6:17-27.
15. Aimsun Online – TSS - Transport Simulation Systems [Internet]. TSS-Transport Simulation Systems. 2015 [citado 17 August 2016]. Disponible en: https://www.aimsun.com/aimsun-online/
16. Ministerio de Fomento. Intensidades Medias Diarias y distribución horaria del día medio. Informes de tráfico. Mapa de Tráfico. 2014
17. Portilla A, Oreña B, Berodia J, Díaz F. Using M/M/∞ Queueing Model in On-Street Parking Maneuvers. Journal of Transportation Engineering. 2009;135(8):527-535.
18. Paneles de mensaje variable para tráfico - LPT-TRAFIC [Internet]. Postigo.es. 2016 [cited 1 October 2016]. Available from: http://www.postigo.es/paneles-de-mensaje-variable-para-trafico.html

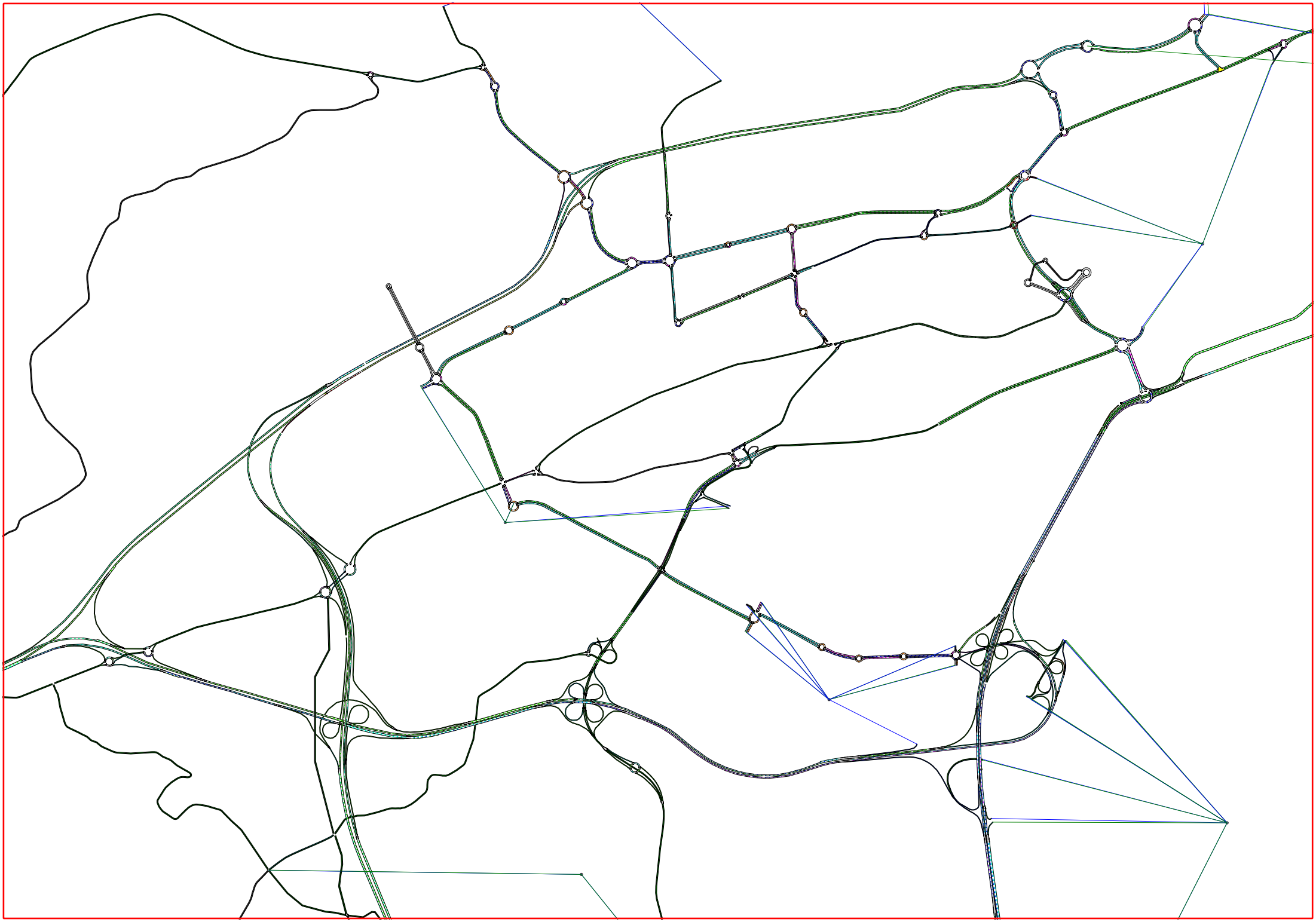
ANEXO: MAPAS DE NIVEL DE SERVICIO DE LOS ESCENARIOS SIN INCIDENCIAS, DO NOTHING PCTCAN, DO NOTHING CORTE INGLES, ESTRATEGIA PCTCAN Y ESTRATEGIA CORTE INGLES EN EL MINUTO 8:38:00 DE LA SIMULACIÓN

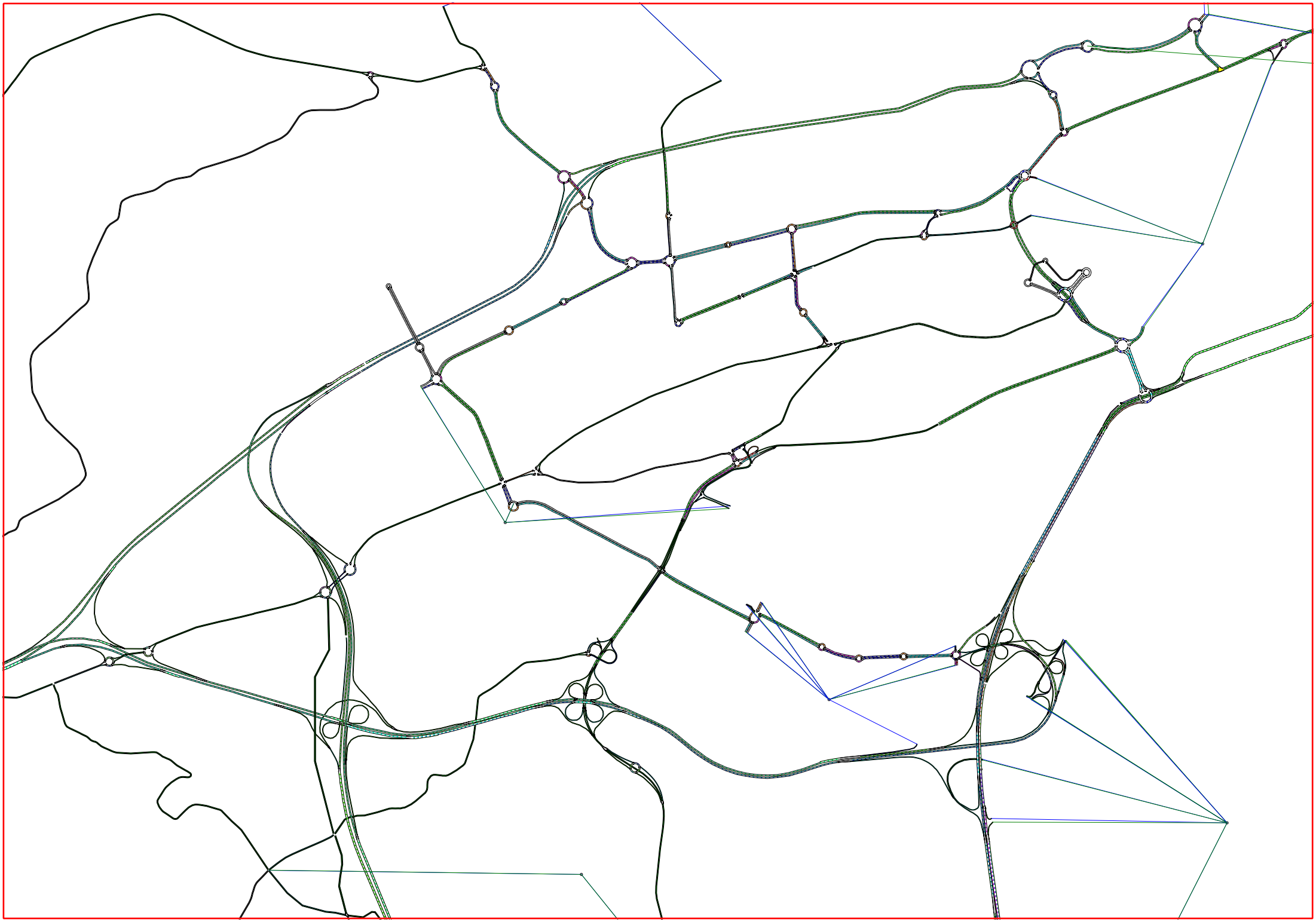
LEYENDA:

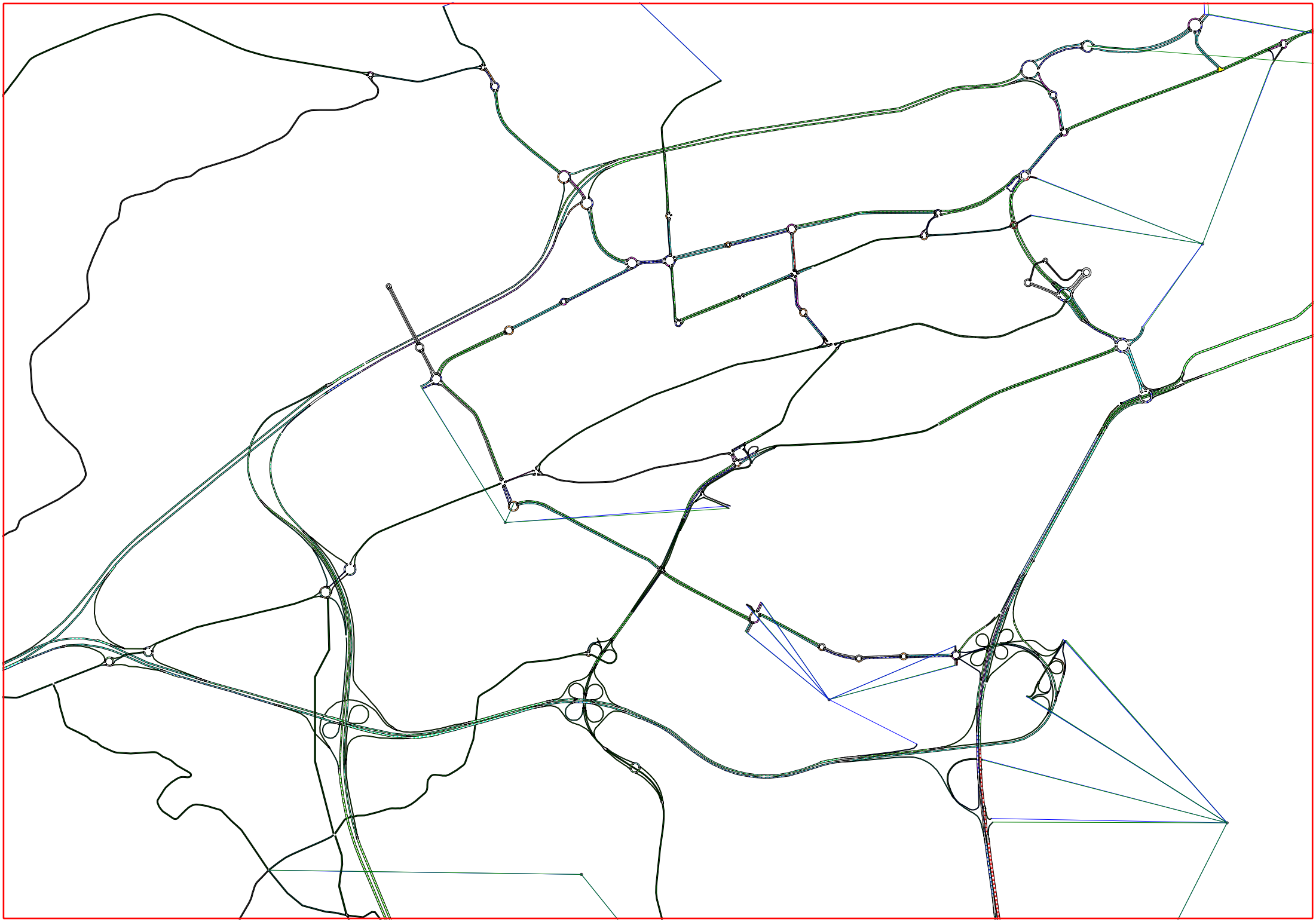


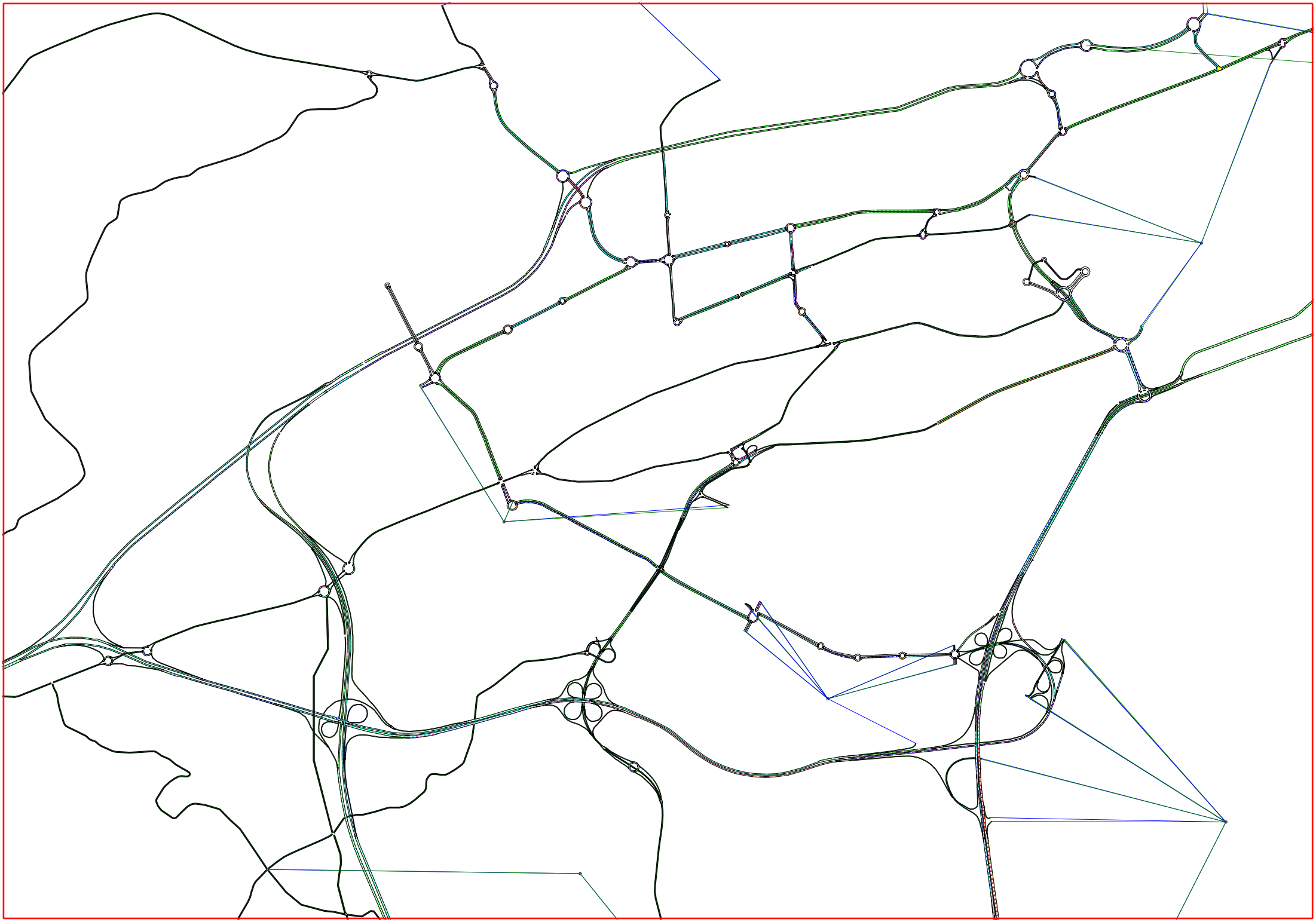












RESUMEN – SUMMARY

Resumen

Título del TFM

Gestión de tráfico ante incidencias en los accesos de Santander.

Autor

Pablo Manzano Moratinos

Directores

Borja Alonso Oreña y Jose Luis Moura.

Convocatoria

Octubre de 2016

Palabras Clave

Gestión de tráfico, incidencias, redireccionamiento, reenrutamiento, algoritmo de detección de incidencias, microsimulación, PMV.

Planteamiento del problema y desarrollo de la solución adoptada

En las últimas décadas, los sistemas de vigilancia y gestión del tráfico se han desarrollado intensamente, apoyados en la investigación y en el desarrollo de las tecnologías de la información, lo que ha dado lugar a nuevas formas de mejorar la funcionalidad de una red de transporte. Por esta razón, cada vez son más las administraciones que recurren a Sistemas Avanzados de Gestión del Tráfico (ATMS) para mejorar el uso de la red de transporte.

El ATMS considera dos problemáticas diferentes: la de la congestión causada por los patrones de tráfico regulares (Sistemas de Gestión de la Congestión o CMS) y los problemas de tráfico causados por incidencias no predecibles (Sistemas de Gestión de Incidencias o IMS).

En el presente estudio se ha desarrollado un sistema de gestión de tráfico ante incidencias (Congestión no recurrente) aplicado a los accesos de la ciudad de Santander (España).

La aplicación al caso de Santander ha seguido la siguiente secuencia:

- Se ha modelizado la red y la demanda en el programa TSS Aimsun. El escenario escogido es la hora punta de un día laborable en invierno, de las 8:00 a.m. a las 9:00 p.m. La demanda se ha extraído de los valores de los detectores registrados en el Mapa de Tráfico 2014 del ministerio de Fomento.
- Se han modelizado dos incidencias características en dos escenarios independientes, una en la S-20 cerca del PCTCAN y otra en la S-10 cerca del Corte Inglés.
- Se ha obtenido una estrategia eficaz para cada caso, comparando con el escenario sin incidencias y el *Do Nothing* en cada caso. Para la activación de las estrategias se ha calibrado una versión simplificada del algoritmo California de detección de incidencias, y se han simulado distintas alternativas hasta obtener una solución óptima y aceptable, atendiendo al siguiente criterio:
    - Capacidad de la estrategia para mitigar la congestión en la zona de la incidencia.
    - Capacidad de la estrategia para satisfacer la demanda durante la hora punta. Esto se analiza observando los valores de cola virtual y de flujo en los resultados de la simulación, que tienen que ser del orden (o más favorables) de los de la simulación sin incidencias. Para que sirva de ejemplo, en la situación “no hacer nada” no se consigue satisfacer la demanda, obteniéndose valores de cola virtual y flujo inaceptables.
    - La estrategia no colapsa o congestiona gravemente otras zonas de la red de menor capacidad al desviar el tráfico.
    - La estrategia ofrece un coste de la red menor que las alternativas, aproximando el estado de la red al de la situación sin incidencias.
- Tras determinar las estrategias, se ha propuesto una red de PMS con unos mensajes determinados asociados a las estrategias adoptadas respetando los criterios de diseño de este tipo de señalización.

Conclusiones

Los resultados de la simulación son los siguientes:

- En el caso de la incidencia en la S-20, se ha conseguido evitar prácticamente la aparición de la congestión, aumentando en 50 horas el coste de la red con respecto al escenario sin incidencias. La solución pasa por redirigir la mayor parte del tráfico que llega desde la A-67 hasta la S-10 impidiendo que deje la A-67 para dirigirse al punto de la incidencia de la S-20.
- En el caso de la incidencia del Corte Inglés se consigue minimizar la congestión de una forma muy apreciable, desviando tres flujos distintos de tráfico para que no colapsen la S-10 así como ningún punto de la red. En concreto se desvía el tráfico que sale de Maliaño, de Somo y de Bilbao, teniendo este que dividirse entre los que van a Santander sur y los que van a Santander centro.
- En ambos casos se mejora el nivel de servicio de la red, el coste y el funcionamiento general, estando la red recuperada al final de la simulación.

Puede concluirse por tanto que es posible diseñar sistemas de gestión eficaces para mejorar significativamente el funcionamiento de una red ante eventos de congestión no recurrente a un coste insignificante en comparación con el impacto económico y ambiental que es evitado con una estrategia adecuada, empleando los recursos que se han descrito en el presente estudio.

Bibliografía

1. Lapuerta M. Regulación del tráfico mediante señalización de velocidad variable: aplicación al acceso por la autovía S-20 en Santander. Universidad de Cantabria. 2015.
2. Mirshahi M., Obenberger J., Fuhs C.A., Howard C.E.,. Krammes R.A., Kuhn B.T., Robin M. Mayhew R.M., Moore M.A., Sahebjam K., Stone C.J., Yung J.L. Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management. Federal Highway Administration 2007 FHWA-PL-07-012.
3. PB Farradyne. Traffic incident management handbook. Federal Highway Administration. 2000.
4. Appelqvist, I., Örngren, S. Rerouting of road traffic: A comparison of different rerouting alternatives at unplanned disruptions in road traffic. Chalmers university of technology 2014
5. Kimley-Horn of Michigan. Inc, Best practices for emergency rerouting. MDOT, 2011.
6. Geroliminis N.,Daganzo C. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. Transportation Research Part B: Methodological. 2008;42(9):759-770.

7. Dunn Engineeing Asociates, Siemens Intelligent Transportation Systems. Traffic control system handbook. Federal Highway administration. 2005.
8. Parkany E. A Complete Review of Incident Detection Algorithms & Their Deployment: What Works and What Doesn't. The New England Transportation Consortium 2005 NETCR37 Project No. 00-7
9. Weil R, Wootton J, García-Ortiz A. Traffic incident detection: Sensors and algorithms. Mathematical and Computer Modelling. 1998;27(9-11):257-291.
10. Petty K, Ostland M, Kwon J, Rice J, Bickel P. A new methodology for evaluating incident detection algorithms. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2002;10(3):189-204.
11. Mahmassani, H.S., Haas, C., Zhou, S. and Peterman, J. Evaluation of incident detection methodologies. Research Report 1795-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin, TX, October 1998, Revised October 1999.
12. Weil R, Wootton J, García-Ortiz A. Traffic incident detection: Sensors and algorithms. Mathematical and Computer Modelling. 1998;27(9-11):257-291.
13. Ching-Ping E, Kolb S, Park B, Kenneth K, Urbanik T. San Antonio Incident Detection Algorithm Study. Texas Transportation Institute. 1996. FHWA/TX-97/2917-1F
14. Asakura Y, Kusakabe T, Long N, Ushiki T. Incident Detection Methods Using Probe Vehicles with On-board GPS Equipment. Transportation Research Procedia. 2015;6:17-27.
15. Aimsun Online – TSS - Transport Simulation Systems [Internet]. TSS-Transport Simulation Systems. 2015 [citado 17 August 2016]. Disponible en: https://www.aimsun.com/aimsun-online/
16. Ministerio de Fomento. Intensidades Medias Diarias y distribución horaria del día medio. Informes de tráfico. Mapa de Tráfico. 2014
17. Portilla A, Oreña B, Berodia J, Díaz F. Using M/M/∞ Queueing Model in On-Street Parking Maneuvers. Journal of Transportation Engineering. 2009;135(8):527-535.
18. Paneles de mensaje variable para tráfico - LPT-TRAFIC [Internet]. Postigo.es. 2016 [cited 1 October 2016]. Available from: http://www.postigo.es/paneles-de-mensaje-variable-para-trafico.html

Summary

TFM Title

Traffic management system against incidents in the entrances of Santander

Author

Pablo Manzano Moratinos

Directors

Borja Alonso Oreña y Jose Luis Moura.

Call

Octubre de 2016

Key words

Traffic management, incidents, rerouting, incident detection algorithm, microsimulation, VMS.

Problem approach, and chosen solution development

During the last decades, traffic management and monitoring systems have been intensely developed, supported by research and by the development of the information techonologies. This resulted in new ways of improving the performance of a transport network. This is why many administrations go to Advanced Traffic Management Systems (ATMS) in order to improve the use of the transport network.

The ATMS is concerned with two different type of problems: the regular traffic patterns caused congestion, (Congestion Management Systems or CMS) and the traffic problems caused by unpredictable incidents (Incident Management Systems or IMS).

In the present study a traffic management system against incidents (Non-recurrent congestion) applied to the accesses of the city of Santander (Spain) has been developed.

- The application to the case of Santander has followed the following sequence:
- The network and the traffic demand have been modelled in the TSS Aimsun software. The chosen scenario is the peak hour in a work day of Winter: from 8:00 a.m. to 9:00 a.m. The demand has been extracted from the values of the registered detectors in the 2014 Traffic Map of the Ministerio de Fomento.
- Two characteristic incidents have been modelled in two different scenarios, one on the S-20 near the PCTCAN and the other on the S-10 near the Corte Ingles.

- For each case, one effective strategy has been obtained, comparing with the scenario without incidents and the *Do Nothing* in each case. For the strategy activation a simplified version of the California Algorithm has been calibrated, and many different alternatives have been simulated until an optimal and acceptable solution was obtained, attending to the following criteria:
    - Strategy capacity to reduce the congestion in the incident area.
    - Strategy capacity to satisfy the demand during the peak hour. This is analysed checking the virtual queue and flow values in simulation results that have to be similar (or better) to the simulation without incidents. For example, in the *Do Nothing scenario*, the demand is not satisfied, so unacceptable virtual queue and flow values are obtained.
    - The strategy doesn't seriously block any low capacity areas of the network by rerouting traffic flow.
    - The strategy offers a lower cost than the other alternatives, getting a network state close to the situation without incidents.
- After determining the strategies, a PMS network has been proposed with their strategy associated messages, according to the designing criteria of this kind of signals.

Conclusions

The simulation results are the following:

- In the S-20 incident case, the congestion has been entirely avoided, increasing the network cost in 50 hours more than the scenario without incidents. The solution is about rerouting most part of the vehicles entering from the A-67 to the S-10 keeping them from leaving the A-67 to go to the incident on the S-20.
- In the Corte Ingles incident case, the congestion is significantly reduced, rerouting three different traffic flows so they neither block the S-10 nor any point of the network. In fact, the traffic from Maliaño, Somo and Bilbao is rerouted, having the last one to divide among those who travel to Santander south and those who travel to the city cenre.
- In both cases the Level of Service of the network is improved, and so does the cost and the network performance. The network is recovered by the end of the simulation.

So, it can be concluded that it is possible to design effective traffic management systems to significantly improve the performance of a network against non-recurrent congestion events, with an insignificant cost compared to the economic and environmental impact that is avoided with an appropriate strategy, using the resources that have been described in the present study.

Bibliography

1. Lapuerta M. Regulación del tráfico mediante señalización de velocidad variable: aplicación al acceso por la autovía S-20 en Santander. Universidad de Cantabria. 2015.
2. Mirshahi M., Obenberger J., Fuhs C.A., Howard C.E.,. Krammes R.A., Kuhn B.T., Robin M. Mayhew R.M., Moore M.A., Sahebjam K., Stone C.J., Yung J.L. Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management. Federal Highway Administration 2007 FHWA-PL-07-012.
3. PB Farradyne. Traffic incident management handbook. Federal Highway Administration. 2000.
4. Appelqvist, I., Örngren, S. Rerouting of road traffic: A comparison of different rerouting alternatives at unplanned disruptions in road traffic. Chalmers university of technology 2014
5. Kimley-Horn of Michigan. Inc, Best practices for emergency rerouting. MDOT, 2011.
6. Geroliminis N.,Daganzo C. Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. Transportation Research Part B: Methodological. 2008;42(9):759-770.
7. Dunn Engineeing Asociates, Siemens Intelligent Transportation Systems. Traffic control system handbook. Federal Highway administration. 2005.
8. Parkany E. A Complete Review of Incident Detection Algorithms & Their Deployment: What Works and What Doesn't. The New England Transportation Consortium 2005 NETCR37 Project No. 00-7
9. Weil R, Wootton J, García-Ortiz A. Traffic incident detection: Sensors and algorithms. Mathematical and Computer Modelling. 1998;27(9-11):257-291.
10. Petty K, Ostland M, Kwon J, Rice J, Bickel P. A new methodology for evaluating incident detection algorithms. Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2002;10(3):189-204.
11. Mahmassani, H.S., Haas, C., Zhou, S. and Peterman, J. Evaluation of incident detection methodologies. Research Report 1795-1, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin, TX, October 1998, Revised October 1999.
12. Weil R, Wootton J, García-Ortiz A. Traffic incident detection: Sensors and algorithms. Mathematical and Computer Modelling. 1998;27(9-11):257-291.

13. Ching-Ping E, Kolb S, Park B, Kenneth K, Urbanik T. San Antonio Incident Detection Algorithm Study. Texas Transportation Institute. 1996. FHWA/TX-97/2917-1F
14. Asakura Y, Kusakabe T, Long N, Ushiki T. Incident Detection Methods Using Probe Vehicles with On-board GPS Equipment. Transportation Research Procedia. 2015;6:17-27.
15. Aimsun Online – TSS - Transport Simulation Systems [Internet]. TSS-Transport Simulation Systems. 2015 [citado 17 August 2016]. Disponible en: https://www.aimsun.com/aimsun-online/
16. Ministerio de Fomento. Intensidades Medias Diarias y distribución horaria del día medio. Informes de tráfico. Mapa de Tráfico. 2014
17. Portilla A, Oreña B, Berodia J, Díaz F. Using M/M/∞ Queueing Model in On-Street Parking Maneuvers. Journal of Transportation Engineering. 2009;135(8):527-535.
18. Paneles de mensaje variable para tráfico - LPT-TRAFIC [Internet]. Postigo.es. 2016 [cited 1 October 2016]. Available from: http://www.postigo.es/paneles-de-mensaje-variable-para-trafico.html