



Universidad Politécnica  
de Madrid

**Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros Informáticos**



Grado en Ingeniería Informática

Trabajo Fin de Grado

**Análisis de sensibilidad del flujo de  
vehículos frente a interrupciones  
aleatorias del tráfico en tramos de una  
red de transporte**

Autor: Jorge Rosa Pastor

Tutor(a): Juan Antonio Fernandez del Pozo de Salamanca

Madrid, Enero 2025

Este Trabajo Fin de Grado se ha depositado en la ETSI Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid para su defensa.

*Trabajo Fin de Grado*  
*Grado en Ingeniería Informática*

*Título:* Análisis de sensibilidad del flujo de vehículos frente a interrupciones aleatorias del tráfico en tramos de una red de transporte

Enero 2025

*Autor:* Jorge Rosa Pastor

*Tutor:* Juan Antonio Fernandez del Pozo de Salamanca  
Departamento de Inteligencia Artificial  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos  
Universidad Politécnica de Madrid

# Resumen

Durante el desarrollo de parte del TFG, se ha diseñado y ejecutado una simulación para analizar el flujo de tráfico, y con esta así poder llegar a evaluar el impacto de las interrupciones aleatorias que se puedan producir en una red de transporte, como puedan ser carreteras, calles o incluso autopistas. Para la codificación de este código, se ha utilizado RStudio[1] como lenguaje principal de programación, utilizando diversas bibliotecas como tidyverse, que permite gestionar los datos, y la biblioteca ggplot2, que permite la visualización de resultados. El objetivo principal de este primer modelo es estudiar si los vehículos, basándose en la posibilidad de ahorrar tiempo, cogerían el desvío, que de forma normal tomaría más tiempo, pero teniendo dicha interrupción la que sería la vía óptima. Para ello se ha creado una función que permite registrar el tiempo total de viaje y el número de desvíos por vehículo, además de calcular el tiempo ahorrado en cada caso. Se ha implementado un algoritmo de Dijkstra para determinar cuál sería la ruta óptima.

---

**Abstract**

During the development of part of the TFG, we have designed and executed a simulation to analyse the traffic flow, and with this, we have been able to evaluate the impact of random interruptions that may occur in a transport network, such as a road, a street, or even a motorway. For the codification of this code, RStudio has been used as the main programming language, using various libraries such as tidyverse to manage the data and the ggplot2 library to visualise the results. The main objective of this first model is to study whether vehicles, based on the possibility of saving time, would take the detour, which would normally take longer, but having such an interruption would be the optimal route. For this purpose, a function has been created to record the total travel time and the number of detours per vehicle, as well as to calculate the time saved in each case. A Dijkstra algorithm has been implemented to determine the optimal route.

# Tabla de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto y definición del trabajo . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Descripción de los capítulos . . . . .	2
<b>2. Trabajos previos</b>	<b>5</b>
2.1. Trabajos Previos . . . . .	5
2.1.1. Estado del Arte . . . . .	5
2.1.2. Modelos de Simulación de Tráfico . . . . .	5
2.1.3. Simulación . . . . .	6
2.2. Simulación del Tráfico y su Impacto . . . . .	6
2.2.1. Previsiones y Planificación . . . . .	6
2.2.2. Nuevos Desarrollos . . . . .	6
<b>3. Desarrollo del prototipo de simulación</b>	<b>7</b>
3.1. Avance del código . . . . .	7
3.1.1. Explicación del código . . . . .	8
3.2. Modelo Empírico . . . . .	9
3.2.1. Vehículos . . . . .	9
3.2.2. Carreteras . . . . .	10
3.2.3. Señalización . . . . .	10
3.2.4. Variables de Estado . . . . .	11
3.2.5. Reglas de Evolución del Sistema . . . . .	11
3.2.6. Componentes del Modelo . . . . .	12
3.2.7. Relaciones entre los Componentes . . . . .	12
3.2.8. Restricciones del Modelo . . . . .	13
3.2.9. Parámetros del Modelo . . . . .	13
3.2.10Agentes del Sistema . . . . .	14
3.3. Modelo visual de la Red . . . . .	15
<b>4. Resultados y análisis de los datos de simulación</b>	<b>19</b>
4.1. Resultados . . . . .	19
4.1.1. Contexto de la simulación . . . . .	19
4.1.2. Explicación de las gráficas obtenidas de la simulación . . . . .	20
4.1.3. Explicación de las métricas obtenidas de la simulación . . . . .	20
4.1.4. Figuras obtenidas de la simulación . . . . .	22

## TABLA DE CONTENIDOS

---

4.2. Conclusiones de los datos . . . . .	29
<b>5. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>33</b>
5.1. Evaluación de los Objetivos del TFG . . . . .	33
5.1.1. Objetivo 1: Definición del problema. . . . .	33
5.1.2. Objetivo 2: Documentar las variables y establecer los objetivos para la simulación. . . . .	33
5.1.3. Objetivo 3: Análisis de requisitos. . . . .	34
5.1.4. Objetivo 4: Simular un número de réplicas suficiente para estimar los indicadores de los resultados de la simulación y considerar la precisión o varianza. . . . .	34
5.1.5. Objetivo 5: Validar y verificar el sistema. . . . .	34
5.1.6. Conclusión sobre los Objetivos . . . . .	34
5.2. Trabajos a futuro . . . . .	35
5.3. Evaluación personal del proceso de realización del TFG . . . . .	35
5.3.1. Fases del proyecto . . . . .	35
5.3.2. Dificultades encontradas . . . . .	36
5.3.3. Aprendizajes adquiridos . . . . .	36
5.4. Impacto . . . . .	36
5.4.1. Impactos en los distintos niveles . . . . .	36
5.4.2. Impacto desarrollo sostenible . . . . .	37
5.5. Análisis del Impacto Potencial de los Resultados . . . . .	38
5.5.1. Beneficios esperados . . . . .	38
5.5.2. Posibles efectos adversos . . . . .	38
<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>
<b>Anexos</b>	<b>45</b>
<b>A. Anexo</b>	<b>45</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contexto y definicion del trabajo

La congestión en las redes y vías de transporte en la sociedad actual no cuenta con un sistema que sea capaz de prever una posible incidencia en la vía con total seguridad; sin embargo, hay trabajos como el de Nagel [2], el cual hace una automatización de flujos de tráfico en las autopistas americanas . Hemos pensado en desarrollar una aplicación de este tipo que, basándonos en algoritmos, permita elegir la ruta más rápida evitando la incidencia en la vía utilizando algoritmos como el de Dijkstra [3].

Según estudios recientes, la congestión afecta no solo los tiempos de viaje y el consumo de combustible, sino también la calidad del aire y el bienestar general de la población [4]. Otros estudios indican que las incidencias afectan a la salud mental de los conductores que se encuentran con estos obstáculos sin la ayuda de una herramienta que sugiera una ruta alternativa, lo que puede aumentar los niveles de depresión [5].

Este trabajo aborda intentar dar un acercamiento hacia una posible solución frente a los problemas descritos arriba, para ello se ha desarrollado un sistema que realiza simulaciones de tráfico, con el objetivo de realizar un patrón, para el cual se han realizado 100 simulaciones, las cuales más adelante de este TFG, serán explicadas.

#### Objetivos del Trabajo

Con este trabajo pretendemos analizar el funcionamiento de una red de transportes y cómo esta reacciona a interrupciones aleatorias en las vías, evaluando si sería útil tomar un desvío para ahorrar tiempo o si es mejor esperar. Los objetivos son:

1. Desarrollar un modelo básico de simulación para estudiar el flujo del tráfico basico inicialmente, para luego incrementar la complejidad..

## Capítulo 1. Introducción

---

2. Implementar un algoritmo de optimización de rutas en presencia de interrupciones basándonos en algoritmos como el de Dijkstra [3].
3. Evaluar el impacto de los desvíos en el tiempo total de viaje de los vehículos.

### 1.2. Motivación

La motivación principal de este trabajo recae sobre la creciente necesidad de comprender y gestionar el tráfico en redes de transporte urbano e interurbano, el cual se puede ver afectado por interrupciones. Estas interrupciones, como accidentes, obras viales o eventos climáticos, entre otros, tienen un impacto significativo en la eficiencia del transporte, los tiempos de viaje, el consumo de combustible y la calidad del aire, como han señalado estudios previos [4, 5].

En la actualidad, los modelos de simulación y los algoritmos de optimización de rutas, como el de Dijkstra [3], han demostrado ser herramientas efectivas para mejorar la gestión del tráfico y mitigar los efectos de estas perturbaciones. Sin embargo, queda mucho por explorar respecto a la sensibilidad de las redes de transporte ante eventos aleatorios. Este trabajo busca contribuir a este campo al desarrollar un modelo de simulación que permita evaluar de manera sistemática cómo los vehículos reaccionan a interrupciones y cómo estas decisiones impactan en el flujo general de tráfico.

Desde una perspectiva social y económica, este estudio tiene el potencial de beneficiar a las ciudades al reducir los costos asociados a la congestión y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos al proponer estrategias que optimicen las rutas alternativas. Además, desde un punto de vista ambiental, una gestión más eficiente del tráfico puede disminuir las emisiones en general. [2, 6].

### 1.3. Descripción de los capítulos

#### Estructura del documento

El presente trabajo se organiza en seis capítulos principales, que se describen a continuación:

- **Resultados y Explicación de los Resultados:** En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas. Se analizan las métricas clave, como el tiempo total de viaje, los desvíos realizados y el impacto de las interrupciones en la red. Se incluyen visualizaciones gráficas que ilustran el comportamiento del sistema en diferentes escenarios y se interpretan los datos en función de las hipótesis planteadas al inicio del proyecto.
- **Trabajos Previos:** En este capítulo se presenta una revisión exhaustiva del estado del arte. Se analizan los principales modelos y enfoques utilizados en la simulación de tráfico, incluyendo modelos estocásticos y algoritmos de optimización, como el de Dijkstra. Además, se exploran trabajos relevantes

### 1.3. Descripción de los capítulos

---

que abordan la gestión del tráfico y el impacto de interrupciones aleatorias en redes de transporte, sentando las bases teóricas del modelo desarrollado en este trabajo.

- **Desarrollo:** Este capítulo detalla la metodología empleada para construir y ejecutar las simulaciones. Se describe el modelo empírico desarrollado, especificando las variables de estado, las reglas de evolución del sistema y las herramientas tecnológicas utilizadas, como RStudio y bibliotecas especializadas. También se explica la estructura del código implementado y los avances realizados en el diseño del prototipo, destacando las mejoras introducidas durante el desarrollo.
- **Impacto y Trabajo Futuro:** Este capítulo aborda las implicaciones del trabajo desde múltiples perspectivas. Se analiza el impacto social, económico y ambiental de los hallazgos, incluyendo posibles aplicaciones prácticas y beneficios potenciales. Además, se identifican las limitaciones del modelo actual y se proponen líneas de trabajo futuras, como la integración de datos en tiempo real y la extensión del modelo a redes de transporte más complejas.
- **Bibliografía y Anexos:** El documento concluye con una recopilación de las referencias bibliográficas utilizadas a lo largo del trabajo. En los anexos, se incluye el código completo del programa desarrollado, junto con ejemplos de simulaciones realizadas, para facilitar su comprensión y posible reutilización en investigaciones futuras.



## Capítulo 2

# Trabajos previos

### 2.1. Trabajos Previos

#### 2.1.1. Estado del Arte

Los modelos de simulación de tráfico han evolucionado notablemente en las últimas décadas debido al crecimiento urbano y los cambios en las preferencias de vehículos, lo que ha llevado al uso de enfoques avanzados basados en teoría de grafos y algoritmos de optimización. Otro modelo destacado en la literatura es el Intelligent Driver Model (IDM), que permite simular el comportamiento de los vehículos en tráfico continuo, considerando factores como la velocidad deseada, la distancia al vehículo precedente y la aceleración óptima. Este modelo ha sido ampliamente aplicado en sistemas de control adaptativo de cruceo (ACC), proporcionando una base sólida para la implementación de tecnologías avanzadas en redes de transporte [7].

Uno de los modelos más reconocidos es el de Nagel y Schreckenberg [2], el cual utiliza reglas estocásticas para modelar el flujo de vehículos. Por otro lado, el uso de algoritmos de grafos para calcular rutas óptimas es ampliamente adoptado en aplicaciones de simulación como Google Maps y Waze. El algoritmo de Dijkstra, desarrollado en 1956, sigue siendo una herramienta esencial para calcular el camino más corto entre dos puntos (Dijkstra, 1959).

#### 2.1.2. Modelos de Simulación de Tráfico

El análisis del impacto que tienen las interrupciones sobre el flujo, los tiempos de trayecto, propagación de congestión en las redes de transporte se ha abordado en múltiples estudios, como el de Verhoef[4], que plantea un modelo de simulación para redes urbanas bajo condiciones de tráfico aleatorias. Este modelo ha sido principalmente utilizado para entender cómo funcionan los embotellamien-

## Capítulo 2. Trabajos previos

---

tos, que se pueden considerar como interrupción de servicio de las vías, en las ciudades. Dando pie a diversos estudios como el de Santibáñez[6], en el cual, a través de una inteligencia artificial, y basándose en por dónde circulan los vehículos, obteniendo esta información de cámaras de vigilancia, junto con los modelos de flujo de tráfico habituales de la zona, se podrían prever estos atascos.

### 2.1.3. Simulación

El tráfico vehicular es uno de los principales desafíos en las redes de transporte modernas. La creciente urbanización y la dependencia de los vehículos motorizados han exacerbado problemas como la congestión, el impacto ambiental y la seguridad vial. La congestión, definida como el estado en el cual la demanda de transporte excede la capacidad de la infraestructura, tiene consecuencias que pueden llegar a ser muy significativas, las cuales se verán en el apartado de impactos.

En cuanto a la simulación, se ha realizado una simulación en tiempo discreto, para facilitar la extracción de datos, y ahorro de recursos informáticos. Como se ha mencionado, antes, se han realizado cien simulaciones que se podrían categorizar como un modelo microscópico, ya que solo estamos focalizando nuestro modelo en un modelo de cinco nodos y un número de coches finitos.

Para dicha simulación, se han usado herramientas como R [8], Python(para la generación del modelo 3.1, y bibliotecas específicas como ggplot2 [9] junto con recursos como [8] y [10]

## 2.2. Simulación del Tráfico y su Impacto

Los modelos de simulación permiten evaluar el impacto de cambios en la gestión del tráfico y proponer mejoras significativas en las redes de transporte.

### 2.2.1. Previsiones y Planificación

- **Señalización:** Evaluar el impacto de modificar o añadir señales de tráfico en puntos críticos.
- **Capacidad:** Analizar cómo el aumento o la reducción de carriles afecta el flujo vehicular.
- **Conexiones:** Identificar nodos clave en la red y optimizar su conectividad.

### 2.2.2. Nuevos Desarrollos

Dado que para este TFG, se ha realizado un modelo básico con apenas nodos y vehículos, los nuevos desarrollos principalmente abarcarían el implementar funciones para poder incluir todo el modelo empírico, aumentar el modelo empírico con las nuevas tendencias en fabricación de vehículos y modificación de las reglas circulatorias.

## Capítulo 3

# Desarrollo del prototipo de simulación

Para realizar la solución al problema, planteamos una simulación [10] de tráfico, en la que primeramente los vehículos fueran de un punto A a un punto B, sin tener en cuenta las densidades de tráfico, ni la distancia a otros vehículos, ni el porcentaje de ocupación de las vías. Tras realizar un número de simulaciones, obtuvimos una serie de gráficas usando los paquetes ggplot [9] y tidyverse [11] y parámetros estadísticos que se definen a continuación. El código contaría con una serie de funciones que calculan métricas como, por ejemplo, el tiempo óptimo de la ruta o el número de interrupciones que ha habido durante la simulación, como por ejemplo también se ha mencionado en estudios como los de [12]. Todo esto estaría calculado durante un bucle de ejecución, el cual tiene unos parámetros de entrada, los cuales serían el tiempo de ejecución del bucle, el número de vehículos en el estado inicial, con sus posiciones iniciales calculadas de manera aleatoria, pero siempre partiendo desde uno de los nodos, y el número de vehículos que entran por minuto en el sistema.

Como añadido, en la simulación el sistema inicial será de 20 vehículos, una velocidad máxima de 30 km/h y una probabilidad de corte de la vía de 0.1 por ciento, y una duración de la interrupción de 0.83 minutos. Añadir también que existen 5 nodos como se puede ver en la gráfica 3.1 que están todos interconectados entre ellos. Además, habría una segunda iteración de este modelo del mapa de la representación el cual contaría con más nodos y vías, para realizar una simulación más realista 3.2.

### 3.1. Avance del código

En la fase inicial del desarrollo del código, se comenzó con una versión simplificada del modelo, en la que se implementaron los conceptos básicos sin complejidad en cuanto a la cantidad de nodos o funciones involucradas. Este primer código consistía principalmente en la simulación de un sistema básico de flujo de vehículos, con pocos elementos y sin consideraciones avanzadas, como las

## Capítulo 3. Desarrollo del prototipo de simulación

---

interacciones entre nodos de la red o la inclusión de funcionalidades complejas.

A medida que avanzó el desarrollo, se introdujeron progresivamente funciones adicionales que permitían una mayor capacidad de análisis, ya que inicialmente, tan solo calculaba el tiempo que había tardado en llegar a su destino, sin saber si había sufrido retenciones o no. También esta versión no contaba con vueltas hacia atrás, lo que hacía que muchos vehículos se quedaran parados indefinidamente, dando así unos resultados no válidos. Esto se solventó añadiendo dos nuevos scripts (ver los Listing A.12 a A.14 y A.15 a A.17 del Anexo)

### 3.1.1. Explicación del código

En cuanto al código, añadido al Anexo, cabe destacar que este cuenta con tres scripts, los cuales utilizan el mismo bucle generador para calcular sus funciones específicas. El primer script, del cual nació este proyecto, va de los Listings A.1 al A.11.

- A.1: se comprueba que la librería necesaria Tidyverse este instalada.
- A.2: se inicializan los parámetros básicos de la función como el número de vehículos iniciales, el número de vehículos que llegan por minuto, la duración de la simulación del bucle, la probabilidad de interrupción y la duración de esta.
- A.3: se definen los nodos, a la distancia que estos se encuentran entre ellos y el tiempo que llevaría de ir de uno a otro.
- A.4: se trata de la función que permite realizar las interrupciones
- A.5: este Listing es importante, ya que utilizando el algoritmo de Dijkstra, calculamos el menor tiempo posible, basándonos en las distancias a los nodos, ya que en este modelo la velocidad de las vías es toda la misma
- A.6: función que calcula la posición del vehículo respecto al nodo utilizado en la gráfica 4.5.
- A.7: llamada a la función de simular el tráfico
- A.8: asignación de la posición inicial para evitar valores nulos
- A.9: ejecución del bucle de simulación con escritura de los resultados en un csv
- A.10: cálculo de todas las funciones en base al bucle
- A.11: generación de las gráficas de análisis de resultados

El segundo script sería el que calcula el tiempo perdido entre el óptimo y el real, el número de vehículos que se vieron obligados a tomar un desvío y, por último, el número de vehículos que se encuentran en cada instante en los nodos y que genera la gráfica 4.6 que va del Listing A.12 al A.14.

- A.12: función para calcular el tiempo óptimo usando Dijkstra sin interrupciones.

- A.13: ejecución de la simulación con comparación de tiempos basado en el bucle mencionado antes.
- A.14: generación de las gráficas de comparación de tiempos reales y óptimos incluyendo la exclusión de resultados no válidos.

Y por último, un script que calcula la distancia al nodo más cercano, para demostrar que hay un cierto movimiento de los vehículos y que genera la gráfica 4.5 que va del Listing A.15 al A.17.

- A.15: simulación de tráfico con seguimiento de vehículos y cálculo de distancia al nodo más cercano y escritura en el csv correspondiente.
- A.16: ejecución de la simulación de tráfico para obtener los resultados
- A.17: generación de las gráficas de distancia al nodo más cercano a lo largo del tiempo

## 3.2. Modelo Empírico

El modelo empírico propuesto para la simulación del tráfico se basa en la representación de distintos tipos de vehículos, carreteras y elementos de señalización. Cada uno de estos componentes tiene un impacto directo en el flujo vehicular y en la dinámica del tráfico, especialmente en situaciones de interrupciones aleatorias en las vías.

### 3.2.1. Vehículos

En primer lugar, se identifican diferentes tipos de vehículos, cada uno con características específicas que influirán en su comportamiento dentro del sistema:

- **Vehículo compacto:** Este tipo de vehículo, de tamaño reducido y con cinco puertas, representa a los automóviles más pequeños que circulan por las vías urbanas.
- **Vehículo tipo sedán:** Similar al compacto, pero de mayor longitud. Su tamaño hace que ocupe más espacio en la vía, lo que puede afectar la densidad del tráfico.
- **Vehículo tipo SUV:** Con una estructura más grande y alta, este vehículo tiene ventajas en terrenos difíciles, como carreteras de tierra o arena, pero su tamaño puede complicar los movimientos en vías más estrechas.
- **Autobús/camión:** Representan los vehículos más grandes del sistema. Debido a su tamaño, los autobuses y camiones tienen una mayor dificultad para realizar giros pronunciados y su velocidad es más baja comparada con los otros tipos de vehículos.
- **Vehículos extra:** En este grupo se incluyen los vehículos no convencionales, como patinetes eléctricos, bicicletas o vehículos de movilidad personal,

## Capítulo 3. Desarrollo del prototipo de simulación

---

que tienen un impacto menor en el flujo general del tráfico, pero no deben ser ignorados.

### 3.2.2. Carreteras

Las carreteras juegan un papel fundamental en la dinámica del tráfico. Existen varios tipos, cada uno con características propias que determinan el flujo de los vehículos.

- **Carretera urbana:** En este tipo de carretera, existen subgrupos que varían según la velocidad máxima permitida (30 km/h, 40 km/h y 50 km/h) y el tipo de superficie. Las vías adoquinadas tienen una velocidad máxima de 30 km/h, mientras que las de asfalto permiten hasta 50 km/h.
- **Carretera tipo autopista:** Las autopistas están divididas en subtipos con velocidades máximas de 90 km/h, 100 km/h y 120 km/h, dependiendo del tramo.
- **Carretera de tierra:** Estas vías no son comunes y presentan restricciones, ya que no todos los vehículos pueden circular por ellas, como los autobuses o camiones.
- **Propiedades de las vías:** Cada tipo de carretera se caracteriza por propiedades adicionales, como la capacidad de la vía, la dirección del tráfico, el número de carriles y, en algunos casos, la exclusividad para el transporte público.
- **Nodos de origen:** Los nodos de origen de la red pueden ser aparcamientos públicos o privados, espacios de estacionamiento en la calle o salidas de otras vías que no forman parte del sistema principal de la red.

### 3.2.3. Señalización

La señalización desempeña un papel clave en la gestión del flujo vehicular y la seguridad. Existen varios tipos de señales que controlan el comportamiento de los vehículos en la red:

- **Semáforos:** Los semáforos regulan el paso de vehículos y peatones, deteniendo el tráfico en momentos específicos para dar prioridad a los peatones o permitir el paso de otros vehículos.
- **Pasos de cebra:** Indican las zonas donde los peatones tienen prioridad para cruzar, obligando a los vehículos a detenerse.
- **Ceda el paso:** Estas señales indican que los vehículos deben ceder el paso a otros que tienen prioridad.
- **Señales de velocidad:** Determinan los límites de velocidad máximos para los vehículos en determinadas vías, asegurando que el tráfico se mantenga dentro de los márgenes de seguridad.

### 3.2.4. Variables de Estado

Las variables de estado son fundamentales para el seguimiento del sistema y la simulación del flujo vehicular. A continuación, se describen las principales variables que se controlan a lo largo de la simulación:

- **Posición del vehículo:** Esta variable indica la ubicación exacta de cada vehículo en la red de transporte en cada momento.
- **Velocidad del vehículo:** La velocidad de cada vehículo se ajusta en función de las características de la vía, el tipo de vehículo y las condiciones del tráfico.
- **Estado de la vía:** Se evalúa el estado de cada tramo de la red, como si está libre, interrumpido o en construcción.
- **Tiempo de viaje acumulado:** Registra el tiempo total transcurrido desde que el vehículo comenzó su viaje, lo que ayuda a medir la eficiencia del recorrido.
- **Estado de desvío:** Indica si un vehículo ha tomado una ruta alternativa debido a interrupciones en la vía principal.
- **Densidad del tráfico:** Mide la concentración de vehículos en un tramo de la vía, lo cual afecta la fluidez del tráfico.
- **Velocidad media de la vía:** Calcula la velocidad promedio de los vehículos en una determinada carretera, teniendo en cuenta las condiciones del tráfico y las interrupciones.

### 3.2.5. Reglas de Evolución del Sistema

El comportamiento de la red de tráfico se basa en un conjunto de reglas que determinan cómo evoluciona el sistema a lo largo del tiempo. Entre las reglas más importantes se encuentran:

- **Algoritmo de selección de ruta [3]:** Este algoritmo determina la ruta óptima para cada vehículo, basándose en el estado actual de las vías. Si se produce una interrupción en la ruta seleccionada, el vehículo recalcula su camino.
- **Interrupciones aleatorias:** Se simulan eventos que bloquean o ralentizan un tramo de la red, como accidentes o condiciones meteorológicas adversas. La frecuencia y duración de estas interrupciones varían según los parámetros del modelo.
- **Cambio de velocidad según tipo de vía:** La velocidad de cada vehículo se ajusta según el tipo de carretera en el que se encuentra (urbana, autopista, tierra, etc.) y las señales de tráfico presentes en la vía.
- **Decisiones de desvío:** Si un vehículo encuentra una interrupción en su ruta principal, toma una decisión sobre si es conveniente o no desviarse a otra vía.

## Capítulo 3. Desarrollo del prototipo de simulación

---

- **Actualización de tiempo de viaje:** El tiempo acumulado del vehículo se incrementa conforme avanza, teniendo en cuenta su velocidad y la distancia recorrida.
- **Reanudación de trayecto:** Cuando una interrupción se resuelve, el sistema permite que los vehículos retomen su ruta original si la situación lo permite, optimizando el flujo de tráfico.

### 3.2.6. Componentes del Modelo

El modelo se compone de varios elementos fundamentales que interactúan entre sí, permitiendo simular el comportamiento del tráfico y sus respuestas ante diferentes escenarios de interrupción.

- **Nodos:** Representan las intersecciones entre al menos dos vías. Los nodos son puntos clave para determinar las rutas que siguen los vehículos y son esenciales para la estructura de la red.
- **Caminos:** Los caminos conectan los nodos y representan las vías de comunicación entre ellos. Cada camino tiene propiedades específicas, tales como longitud, límite de velocidad y capacidad, que determinan su capacidad para manejar el flujo de tráfico.
- **Vehículos:** Son los agentes que transitan por la red de transporte. Cada vehículo tiene atributos como velocidad, posición y tipo, lo que determina su comportamiento en la simulación y su interacción con otros vehículos y con las vías.
- **Eventos de Interrupción:** Los eventos de interrupción incluyen bloqueos o alteraciones en los caminos (como accidentes, trabajos de construcción o condiciones meteorológicas adversas) que afectan el flujo de tráfico, ralentizando o desviando a los vehículos.

### 3.2.7. Relaciones entre los Componentes

Las relaciones entre los diferentes componentes del modelo permiten que se simule la dinámica del tráfico. Estas relaciones son las siguientes:

- **Conexión Nodo-Camino:** Cada camino conecta exactamente dos nodos. Este es un aspecto esencial para la creación de la red de transporte, que se modela como un grafo donde los nodos representan intersecciones y los caminos representan los tramos de carretera entre ellas. Cada conexión puede tener diferentes características, como la dirección del tráfico o el tipo de vía.
- **Vehículo-Camino:** Los vehículos transitan por los caminos, modificando su velocidad según las condiciones del tráfico, las características de la vía y las interrupciones. Un vehículo puede estar en un camino o en varios, dependiendo de su recorrido. Además, los vehículos deben respetar las señales de tráfico presentes en los caminos que transitan.

- **Interrupción-Camino:** Las interrupciones afectan directamente los caminos, impidiendo o limitando la circulación de los vehículos. Cuando ocurre una interrupción, los vehículos deben ajustar su trayecto en función de la severidad y duración de la interrupción. Las interrupciones pueden hacer que los vehículos cambien de camino o reduzcan su velocidad.
- **Vehículo-Interrupción:** Los vehículos pueden verse afectados por las interrupciones, especialmente si están en el tramo afectado. En caso de que la interrupción sea grave, el vehículo puede tomar una ruta alternativa o quedarse detenido. La relación entre vehículos e interrupciones también puede implicar decisiones de desviación y ajustes en la ruta seleccionada.
- **Vehículo-Vehículo:** Los vehículos interactúan entre sí a medida que comparten el mismo espacio en la vía. La densidad del tráfico y el comportamiento de otros vehículos influyen en la velocidad de un vehículo y en su capacidad para mantener una distancia segura. Además, en situaciones de congestión, los vehículos pueden cambiar de carril o reducir su velocidad debido a la proximidad de otros vehículos.

### 3.2.8. Restricciones del Modelo

El modelo presenta diversas restricciones que aseguran la coherencia y el realismo de la simulación. Estas restricciones son fundamentales para garantizar el comportamiento correcto de la red de tráfico:

- **Límites de Velocidad:** La velocidad de los vehículos está limitada por las características del camino en el que circulan. Además, las señales de tráfico imponen límites adicionales que deben ser respetados por todos los vehículos.
- **Conexión en la Red:** Todos los nodos están conectados por al menos un camino, lo que asegura que el sistema sea transitable y no se produzcan bloqueos totales en la red.

### 3.2.9. Parámetros del Modelo

Los parámetros definen las condiciones iniciales y las características generales del sistema, y son esenciales para la simulación del tráfico. Los parámetros principales incluyen:

- **Número de Vehículos Inicial:** Este parámetro define la cantidad de vehículos presentes en la red al inicio de la simulación. Es clave para evaluar la congestión del tráfico y la capacidad de la red.
- **Duración de la Simulación:** Establece el tiempo total durante el cual se ejecutará el modelo, lo que permite observar cómo se comporta la red de tráfico a lo largo del tiempo.
- **Probabilidad de Interrupción:** Este parámetro determina con qué frecuencia ocurren las interrupciones en los caminos, lo que impacta en el flujo vehicular y en la elección de rutas.

- **Duración de las Interrupciones:** Define el tiempo promedio que una interrupción afectará a un camino, impidiendo el paso de los vehículos o reduciendo la velocidad en ese tramo.

### 3.2.10. Agentes del Sistema

Los agentes del modelo son los elementos que interactúan dentro del sistema y que tienen un comportamiento específico. Los principales agentes son:

- **Vehículos:** Cada vehículo tiene reglas específicas para decidir qué rutas tomar, cómo adaptarse a las interrupciones y cómo interactuar con otros vehículos y con las vías. Los vehículos son los principales actores dentro de la simulación.
- **Interrupciones:** Las interrupciones son eventos aleatorios que ocurren en los caminos. Estas interrupciones alteran el flujo de tráfico y afectan las decisiones de los vehículos en cuanto a la elección de rutas y la velocidad.

### 3.3. Modelo visual de la Red

El primer modelo que se representó fue el siguiente, contando con solo cinco nodos y todos interconectados.

### Capítulo 3. Desarrollo del prototipo de simulación

---

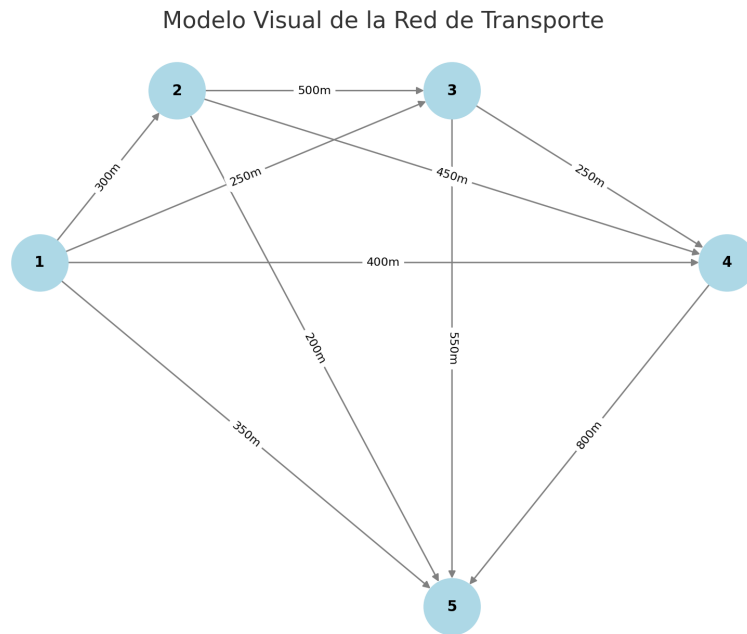


Figura 3.1: Grafica primer modelo

La siguiente imagen representa la que habría sido la segunda iteración del mapa representado en la simulación.

### 3.3. Modelo visual de la Red

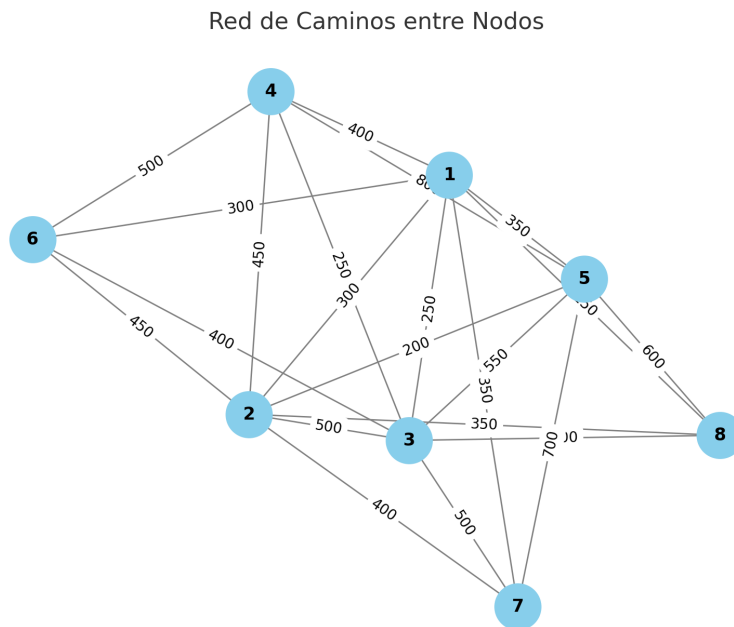


Figura 3.2: Gráfica segundo modelo



## Capítulo 4

# Resultados y análisis de los datos de simulación

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Contexto de la simulación

Primeramente vamos a dar unos datos útiles acerca de la simulación realizada:

- **Periodo de Simulación:** El periodo de simulación abarca un día completo de tráfico, simulado en intervalos horarios. Este periodo se considera representativo de las fluctuaciones de tráfico y las interrupciones aleatorias que podrían ocurrir en un entorno real a una escala reducida.
- **Réplicas:** Para asegurar la fiabilidad de los resultados, se realizaron un total de 100 réplicas del experimento. Este número de réplicas permite obtener una estimación estadística robusta de los indicadores de rendimiento, como los tiempos de viaje, las distancias recorridas y el impacto de las interrupciones aleatorias.
- **Tamaño del Dataset:** Cada réplica genera un conjunto de datos que incluye información sobre los tiempos de viaje de los vehículos, el número de vehículos en circulación y las interrupciones observadas durante la simulación, el tamaño total es de aproximadamente ciento treinta y seis mil cuatrocientas líneas del dataset, incluyendo las cabeceras, repartidas en tres csv, al igual que el número de scripts, dando resultados distintos en cada uno. Las cabeceras seguirían un esquema similar, siempre empezando por el id del vehículo y del minuto de la ejecución del programa, para posteriormente mostrar las variables específicas de cada csv.

También añadir que es un programa secuencial, ya que primeramente hay que ejecutar el primer script, para luego tener acceso a los datos de la ejecución de este en los otros dos posteriores scripts, tal y como se ha explicado en el apartado de Explicación del código

### 4.1.2. Explicación de las gráficas obtenidas de la simulación

Como se puede observar en la figura 4.1, hay diversos vehículos que toman la decisión de cambiar el camino por el que iban a circular debido a una interrupción en el camino que iban a pasar, con lo cual eligen tomar uno que, aunque es más largo, obtienen un menor tiempo de camino debido a la no información del tiempo que quedaría para que se rehabilitase la circulación.

En cuanto a la figura 4.2, podemos observar cómo en el nodo 5 hay un incremento de los vehículos debido a los desvíos que se producen, siguiendo la tabla 4.1, en la que se puede observar cómo hay dos barras que indican desvíos tanto de 3 a 5 como de 4 a 5, incluyendo en estos últimos desvíos procedentes de la barra de desvío de 2 a 4 y de 3 a 4.

Haciendo uso de lo visto en los dos párrafos anteriores, y añadiendo la información que se puede extraer de la gráfica 4.3, se puede observar cómo a partir del minuto 5, hay un incremento sustancial en el desvío de los vehículos debido a las interrupciones que se producirían en las vías en las que ellos iban a circular, e incluso viendo la referencia que se hace hacia los cortes de tráfico, visto en la gráfica 4.4, se puede observar un gran crecimiento de estos en el minuto 5 de simulación.

En el caso de la gráfica de 4.5, podemos observar cómo se desplazan los vehículos entre los distintos nodos, siendo así visibles los desplazamientos de los vehículos a través de las carreteras que unen a éstos.

Y por último la gráfica que más información acerca de la afectación que tienen los cortes en los trayectos, 4.6, en la cual se ven los 20 vehículos iniciales, ya que de haber añadido más, la gráfica sería muy poco legible, se puede observar el tiempo que añadiría algún corte a la ruta óptima del vehículo, teniendo ejemplos de no afectación de incidencias como para el 1, 7, 8, 15, 17 y 20, y por el otro lado siendo los más afectados el 12 y 18 con varios retrasos de estos de 22 minutos respecto a la ruta más óptima que podrían haber tomado. También se ha mostrado que en diversas simulaciones, en diversas ocasiones, el aumento del tiempo es de 0, como ocurre en la figura mencionada, lo cual puede ser bastante realista porque puede que haya simulaciones en las que se dé el caso de que no haya una interrupción del servicio para el desplazamiento realizado.

### 4.1.3. Explicación de las métricas obtenidas de la simulación

Además de las gráficas mencionadas anteriormente, tras realizar en torno a 100 simulaciones, hemos llegado a los siguientes datos obtenidos de estas:

Columna	Media	Varianza	Máximo	Mínimo
origen	3.73	1.30	5.00	1.00
destino	3.45	2.26	5.00	1.00
desvio	0.99	1.05	3.00	0.00
tiempo_desvio	52.29	6043.64	268.44	0.00

Cuadro 4.1: Estadísticas descriptivas de las columnas de la simulación

Los cuales estarían representados por, origen el nodo de partida, el destino el nodo destino, desvío, correspondería al número de desvíos que toma el vehículo, y el tiempo de desvío el tiempo que se añade a la ruta.

<b>Columna</b>	<b>Media</b>	<b>Varianza</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
tiempo_total_viaje	9.62	58.55	35.00	0.00
tiempo_optimo	8.70	42.26	18.00	0.00
tiempo_añadido_final	0.94	13.90	23.0	0.00

Cuadro 4.2: Estadísticas descriptivas de los tiempos de viaje

En cuanto a esta tabla, se puede observar que solo hay 3 variables, siendo estas el tiempo total que ha tardado el vehículo en realizar el viaje, frente a la de abajo que sería el tiempo óptimo que debería haber tardado y, por último, una variable del tiempo que se ha añadido al trayecto, restando el tiempo final menos el óptimo.

La tabla a continuación sirve para demostrar simplemente que la simulación se sigue ejecutando, y que hay un movimiento permanente de vehículos pese a que muchos estén parados, dando como resultados que algunos vehículos tienden a estar más cerca o en un nodo incluso que otros, de lo cual se puede extrapolar que hay vehículos como es el caso del 0, que podría haberse encontrado interrupciones y por eso la distancia es siempre la misma al nodo mientras que otros si tienen cierta distancia, siendo esta prueba de que no han sido cortados por la interrupción ya que esta cortaría la vía entera.

#### Capítulo 4. Resultados y análisis de los datos de simulación

---

<b>Minuto</b>	<b>Id del vehículo</b>	<b>Origen</b>	<b>Destino</b>	<b>Distancia al nodo más cercano</b>
0	1	5	1	0
1	1	5	1	0
2	1	5	1	0
3	1	5	1	1.25
4	1	5	1	2.22
5	1	5	1	0.27
6	1	5	1	2.06
7	1	5	1	1.21
8	1	5	1	1.44
9	1	5	1	2.12
10	1	5	1	0.54
11	1	5	1	2.15
12	1	5	1	0.94
13	1	5	1	1.65
14	1	5	1	2.04
15	1	5	1	0.82
16	1	5	1	2.27

Cuadro 4.3: Estadísticas de la distancia a los nodos

#### 4.1.4. Figuras obtenidas de la simulación

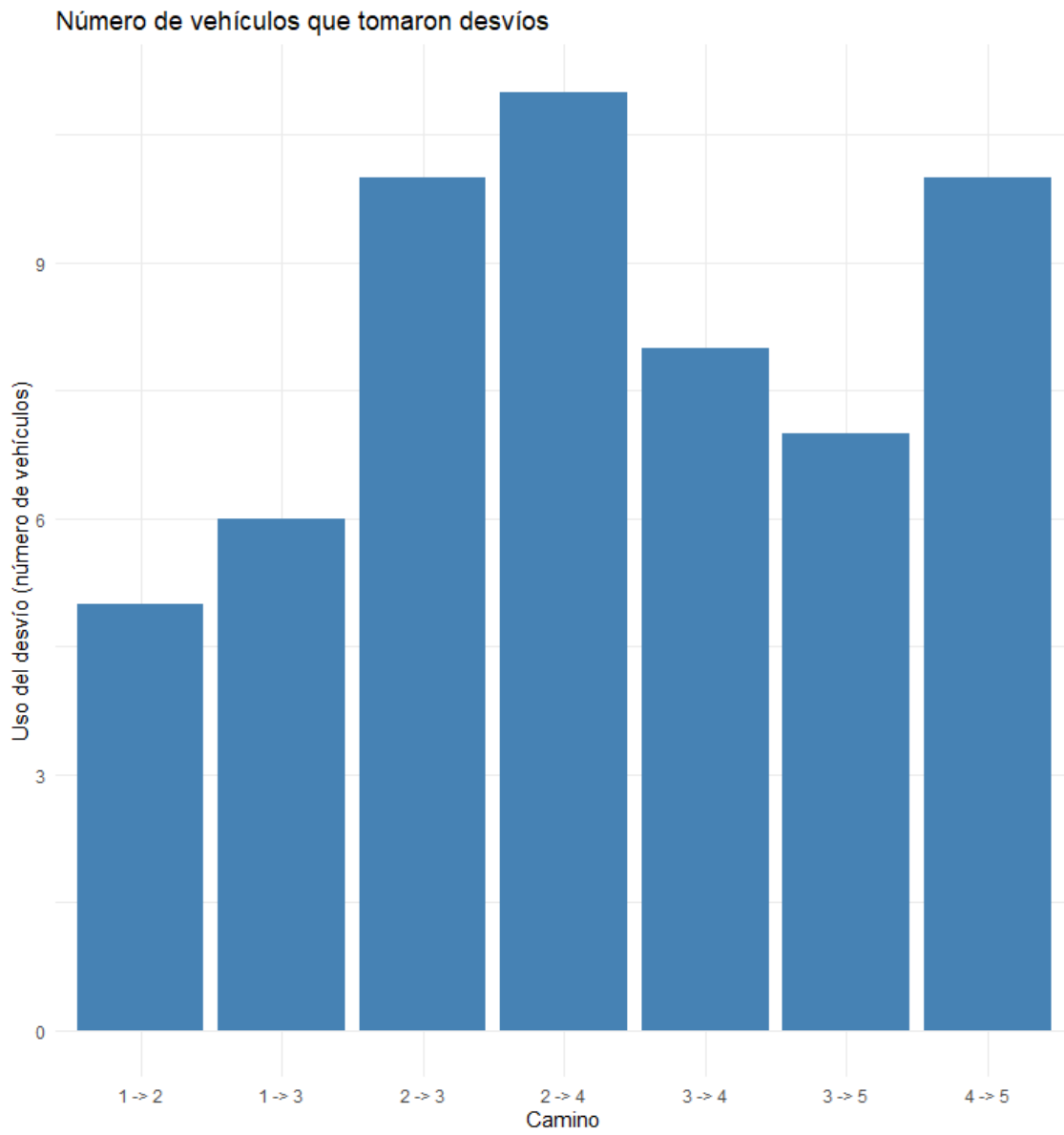


Figura 4.1: Gráfica del número de vehículos que tomaron los desvíos

## Capítulo 4. Resultados y análisis de los datos de simulación

---

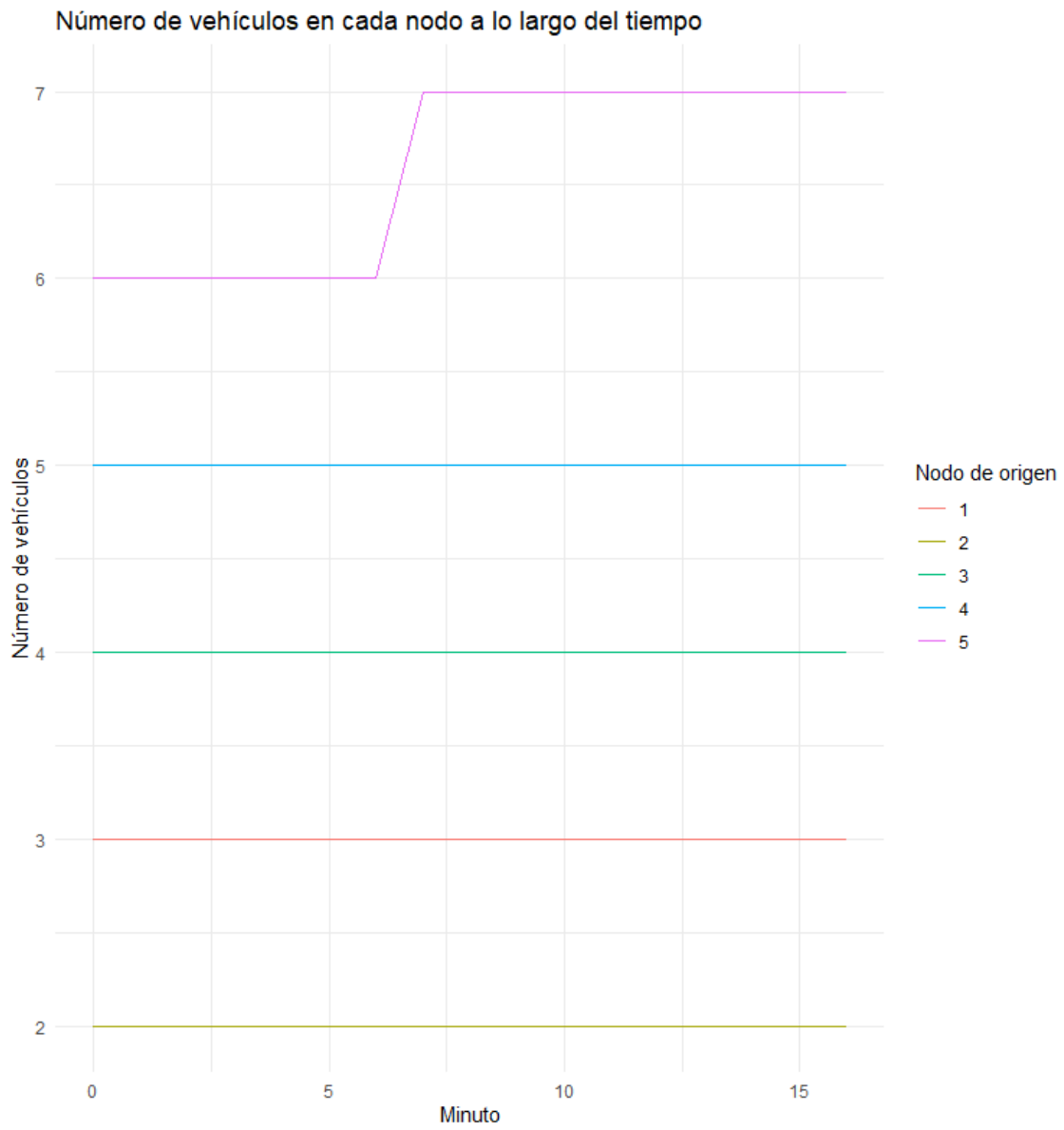


Figura 4.2: Gráfica del número de vehículos en cada nodo

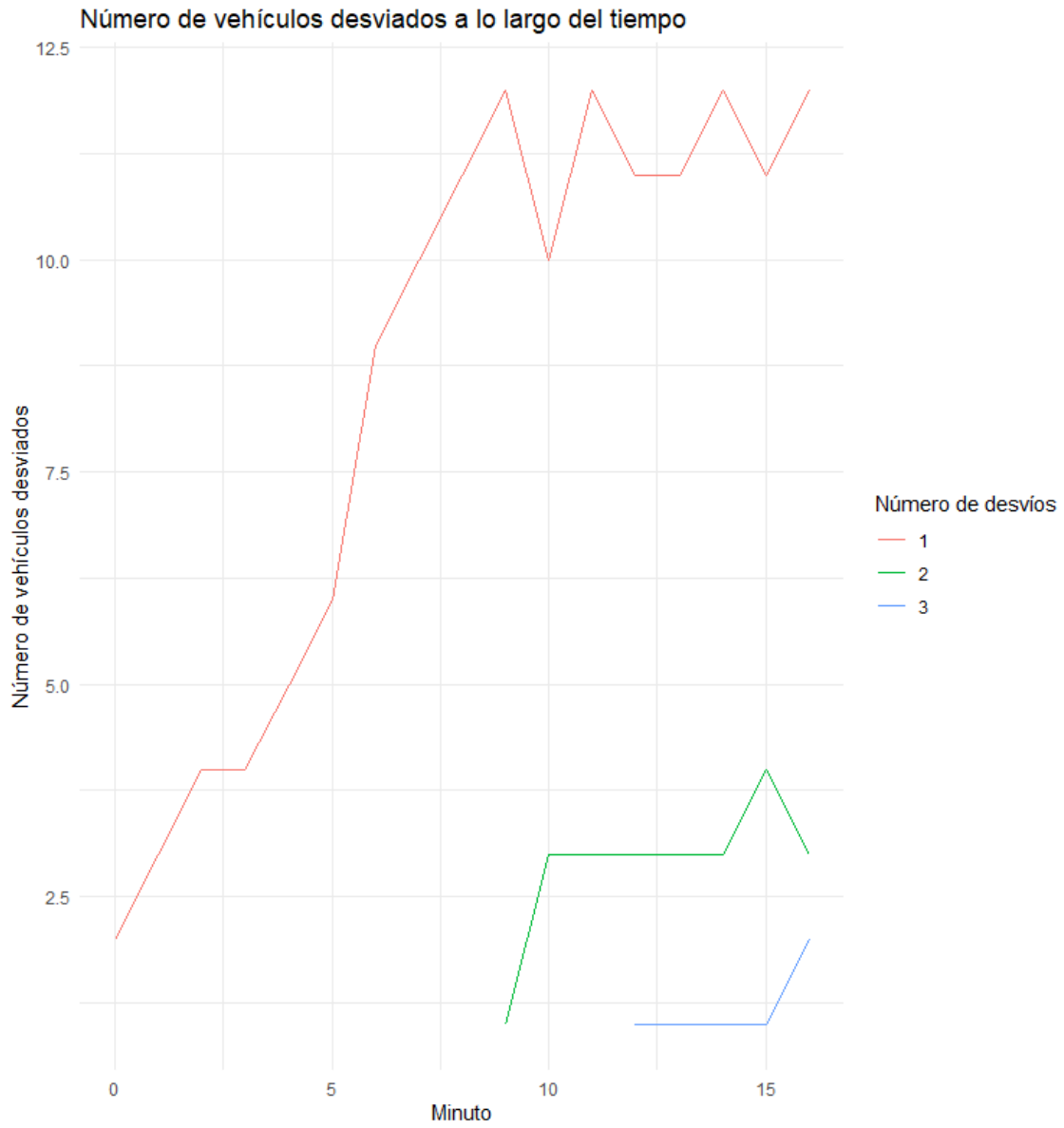


Figura 4.3: Gráfica del número de vehiculos a lo largo del tiempo

## Capítulo 4. Resultados y análisis de los datos de simulación

---

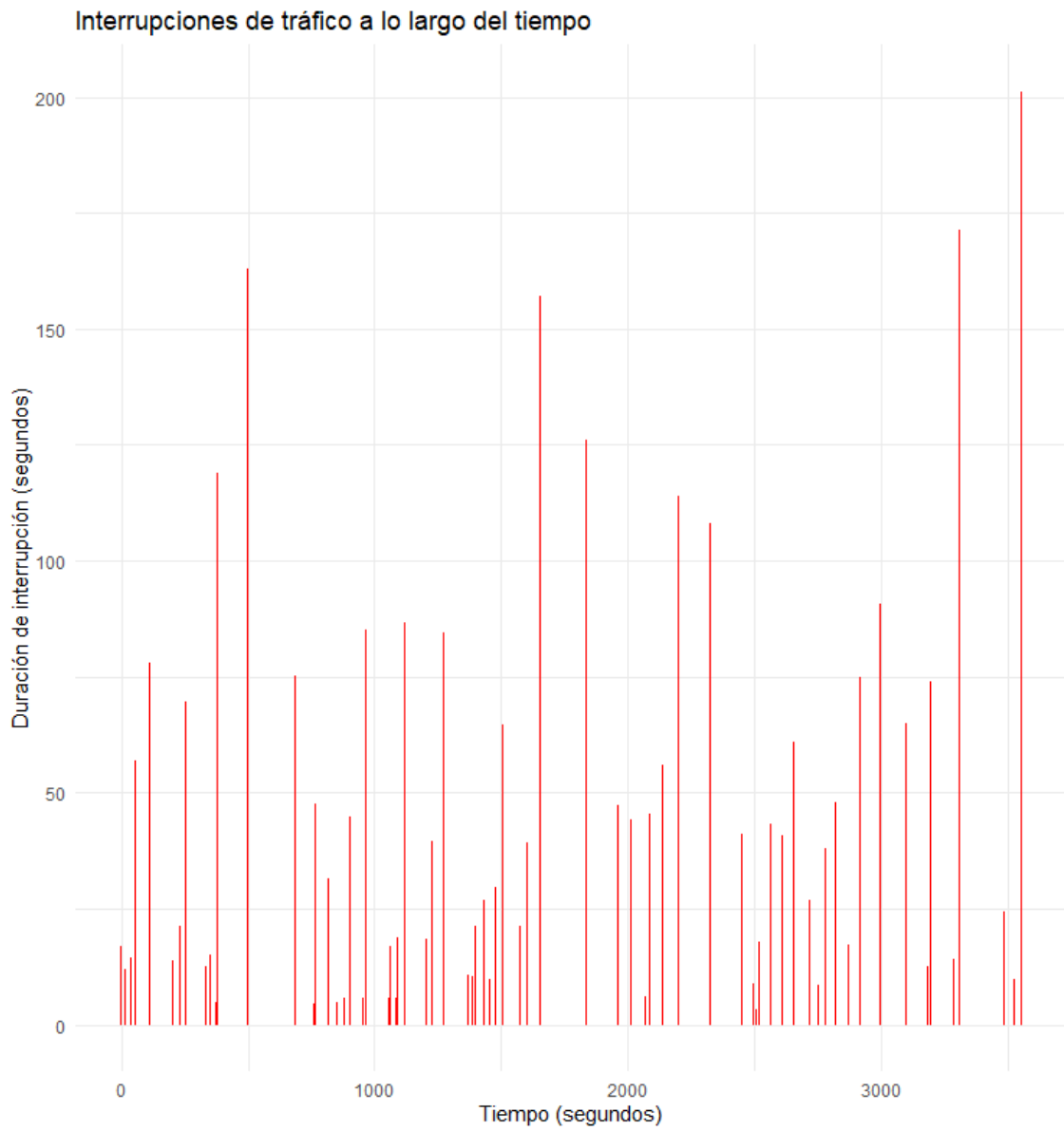


Figura 4.4: Gráfica del número de interrupciones de tráfico a lo largo del tiempo



Figura 4.5: Gráfica de la distancia al nodo mas cercano

## Capítulo 4. Resultados y análisis de los datos de simulación

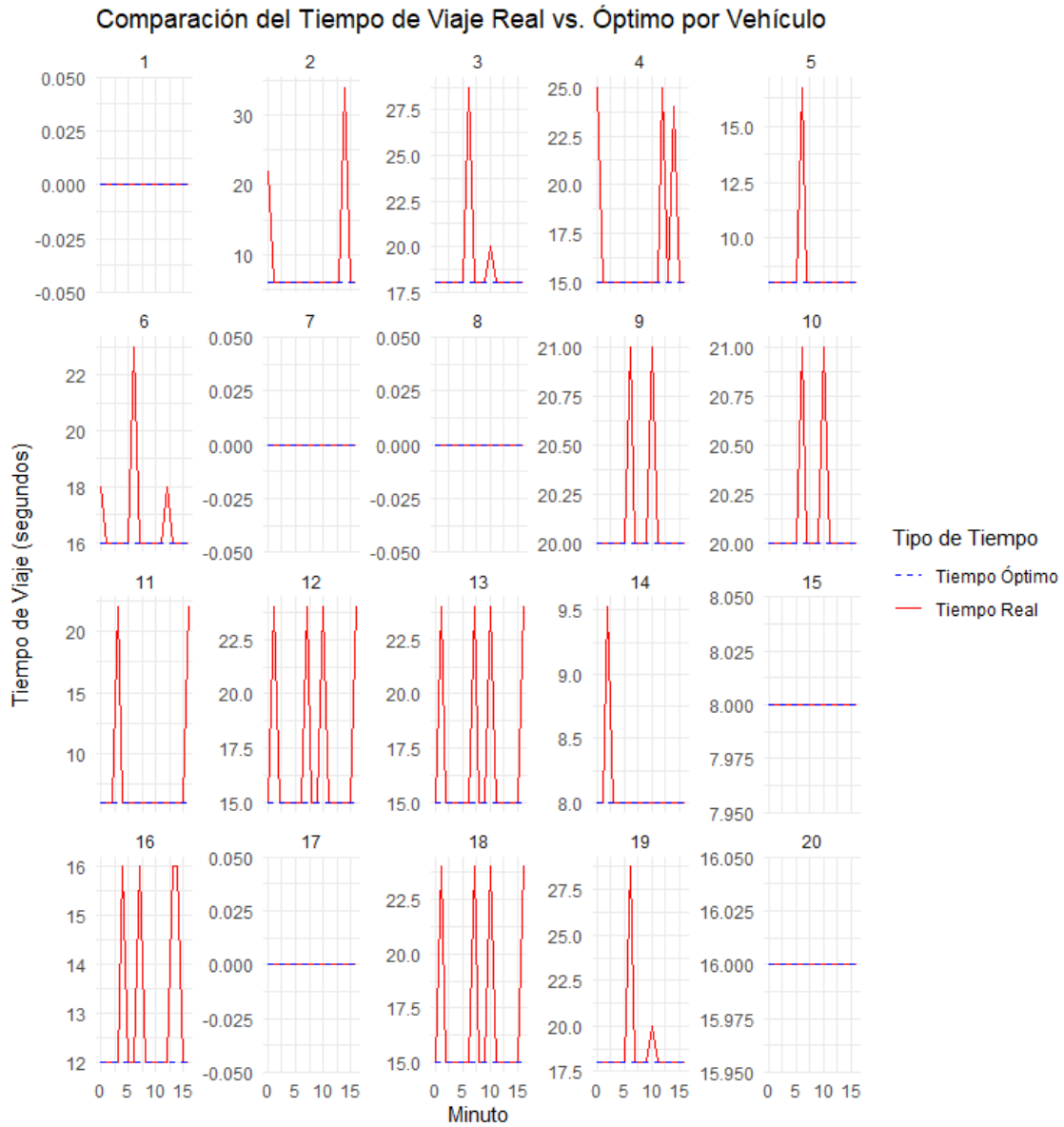


Figura 4.6: Gráfica de comparación de tiempos versus

### 4.2. Conclusiones de los datos

Visto los resultados obtenidos tanto por las gráficas como por las tablas, podemos realizar varias afirmaciones, dado que todas las métricas son estimaciones que se obtienen del experimento de simulación y su precisión depende del tamaño de los datos y del número de réplicas, ya que no se podría llegar a prever de manera exacta un modelo. Se podría llegar a realizar un modelo predictivo, pero al ser de carácter aleatorio las interrupciones, hay algunas que se podría llegar a estimar su tasa de aparición en caso de factores predictibles como pudiera ser, por ejemplo, un corte debido a la nieve o algún evento climatológico, ya que estos son predecibles con el tiempo, al igual que, por ejemplo, con los eventos deportivos o atascos que suelen ser habituales en alguna zona concreta de la vía a una hora determinada como pudiera ser la salida de los trabajos, o el hecho de que muchos padres realicen desplazamientos para llevar a sus hijos al colegio, pero. Sin embargo, con muchos otros factores sería difícil de prever el corte como pudiera ser, por ejemplo, un socavón provocado por un hundimiento de la vía, accidentes de tráfico, retenciones forzadas por el efecto acordeón [13]. Con lo cual, basado en lo dicho anteriormente, vamos a dar unas conclusiones no deterministas, ya que se trata tan solo de un modelo. Para ello vamos a sacar conclusiones generalistas obtenidas de las métricas obtenidas.

- **Media:** El tiempo promedio de viaje incrementa notablemente en presencia de interrupciones aleatorias, especialmente en tramos con alta densidad vehicular. Esto indica que las interrupciones impactan de manera uniforme en el rendimiento general de la red, alargando los tiempos de recorrido de la mayoría de los vehículos. También de la tabla 4.1, podemos concluir que de media se produce de media aproximadamente un desvío debido a la interrupción que se produce en la vía que el vehículo necesita usar, el tiempo de desvío medio es bastante elevado, el cual es de media 52.29 minutos añadidos al trayecto original, al igual que en la tabla 4.2, se puede observar como también se añade de media al menos 1 minuto por ejecución del paso del tiempo, es decir no por cada desvío, sino cada vez que el programa saca una traza.
- **Varianza:** La varianza en el tiempo de viaje aumenta significativamente en escenarios con interrupciones, demostrando que el sistema se vuelve más inestable y presenta mayores fluctuaciones en el rendimiento del tráfico, viendo como por ejemplo en la tabla 4.1, una varianza muy elevada de 6043.64 haciendo la simulación demasiado inestable al menos en ese parámetro.
- **Máximo:** El tiempo máximo de viaje se dispara en tramos afectados por interrupciones, reflejando que un pequeño número de vehículos experimenta retrasos extremos, lo cual tiene un fuerte impacto en algunos usuarios determinados, pero sin embargo en otros como se verá en el siguiente apartado, no tienen desviación del tiempo óptimo ninguna.
- **Mínimo:** El tiempo mínimo de viaje permanece casi constante, incluso con interrupciones. Esto sugiere que los vehículos que no atraviesan los tramos

## Capítulo 4. Resultados y análisis de los datos de simulación

---

afectados no sufren un impacto directo, manteniendo una eficiencia óptima en condiciones normales, tal y como se puede observar en la gráfica 4.6, hay vehículos cuyo tiempo de desvío es nulo por tiempo de ejecución del programa, lo que indica que no se habrían visto afectados por ninguna interrupción de la vía que iban a haber utilizado.

- **Variabilidad del flujo vehicular:** Durante el análisis, las métricas de dispersión, como la desviación estándar y el coeficiente de variación, han permitido identificar que las interrupciones aleatorias generan una alta variabilidad en el flujo vehicular. Este efecto es especialmente pronunciado en tramos próximos a nodos críticos de la red, destacando que la congestión no es uniforme y está influenciada por las características estructurales de cada tramo.
- **Distribución del tiempo de viaje:** Los histogramas y análisis de frecuencias realizados muestran que, bajo interrupciones, el tiempo de viaje presenta una distribución asimétrica con un desplazamiento hacia valores más altos y una mayor cola derecha. Esto indica que un pequeño porcentaje de vehículos experimenta tiempos de viaje significativamente más largos, lo que afecta negativamente al promedio global.
- **Correlación entre variables clave:** Al calcular las métricas de correlación, se ha identificado una relación directa entre la densidad vehicular y el tiempo promedio de viaje, así como entre el tiempo de respuesta ante una interrupción y la recuperación del flujo. Esto respalda la importancia de estas variables como indicadores clave para analizar el comportamiento del tráfico tras una perturbación.
- **Eficiencia de las rutas alternativas:** En las simulaciones realizadas, los tiempos promedio y máximos de viaje en rutas alternativas evidencian que, aunque estas pueden reducir parcialmente la congestión, su efectividad disminuye considerablemente a medida que aumenta el flujo vehicular desviado. Este comportamiento sugiere que las rutas alternativas no siempre son suficientes para mitigar los efectos de interrupciones importantes.
- **Sensibilidad del sistema a las interrupciones:** El análisis de sensibilidad ha revelado que las interrupciones afectan con mayor severidad a los tramos con alta densidad inicial y baja capacidad para absorber el flujo vehicular. Estos resultados sugieren que focalizar esfuerzos en aumentar la capacidad en ciertos nodos estratégicos de la red podría mitigar significativamente los impactos de las interrupciones.
- **Recuperación del sistema tras interrupciones:** Analizando las métricas temporales, como la velocidad promedio y el tiempo de viaje por tramo, se concluye que el tiempo requerido para la recuperación del flujo vehicular depende de la magnitud de la interrupción y de las condiciones iniciales del tramo afectado. En tramos con alta densidad vehicular, el proceso de recuperación es más lento.
- **Robustez del sistema:** Los indicadores calculados para evaluar la robustez del sistema han mostrado que algunas configuraciones de la red son

## **4.2. Conclusiones de los datos**

---

más resilientes ante interrupciones pequeñas. Sin embargo, la red en su conjunto sigue siendo vulnerable frente a fallos en nodos clave, como intersecciones de alta conectividad.



## Capítulo 5

# Conclusiones y trabajo futuro

### 5.1. Evaluación de los Objetivos del TFG

En el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado (TFG), se han establecido una serie de objetivos clave que guiarán la investigación y el diseño de la simulación del flujo vehicular en redes de transporte, considerando interrupciones aleatorias del tráfico. A continuación, se evalúan los avances y logros respecto a cada uno de los objetivos establecidos:

#### 5.1.1. Objetivo 1: Definición del problema.

- **Descripción:** Se plantea desarrollar varios prototipos con complejidad creciente, tanto en términos del tamaño y la estructura de la red de transporte, como en la cantidad de vehículos y el modelo de tráfico utilizado.
- **Evaluación:** Este objetivo ha sido parcialmente alcanzado. Se ha comenzado a definir el problema y se ha desarrollado un prototipo básico que tiene un tamaño reducido. Además, la complejidad en términos de número de vehículos y tipos de modelos de tráfico aún necesita una mayor profundización para abordar escenarios más realistas y detallados.

#### 5.1.2. Objetivo 2: Documentar las variables y establecer los objetivos para la simulación.

- **Descripción:** Este objetivo implica la identificación y documentación de las variables relevantes para la simulación del tráfico y la determinación de los objetivos de la misma.
- **Evaluación:** Este objetivo ha sido cumplido de manera parcial. Se han identificado variables importantes como el tiempo de viaje, las distancias y las interrupciones aleatorias. Sin embargo, la documentación completa de todas las variables necesarias y la definición detallada de los objetivos de la simulación podrían beneficiarse de una mayor claridad, especialmente en relación con los indicadores de rendimiento que se desean optimizar.

### 5.1.3. Objetivo 3: Análisis de requisitos.

- **Descripción:** Se propone definir las estructuras de datos para la red de transporte y el flujo vehicular, así como para las medidas de rendimiento. Además, se debe diseñar un sistema de logs para la simulación y crear una interfaz esquemática para visualizar el estado del flujo (dashboard).
- **Evaluación:** Este objetivo ha sido parcialmente alcanzado. Se han definido las estructuras de datos básicas para representar la red y el flujo de vehículos. También se ha diseñado un esquema inicial para la recopilación de datos mediante un sistema de logs. Sin embargo, la implementación de un dashboard funcional que visualice el flujo vehicular y sus indicadores de rendimiento requeriría de más trabajo para ser completamente operativo.

### 5.1.4. Objetivo 4: Simular un número de réplicas suficiente para estimar los indicadores de los resultados de la simulación y considerar la precisión o varianza.

- **Descripción:** Este objetivo se enfoca en la ejecución de suficientes réplicas para obtener una estimación precisa de los indicadores que caracterizan los resultados de la simulación, teniendo en cuenta la variabilidad de los datos.
- **Evaluación:** Este objetivo ha sido parcialmente alcanzado. Se han realizado simulaciones con un número limitado de réplicas para evaluar la precisión de los resultados. No obstante, aún es necesario realizar más réplicas y evaluar la precisión y varianza de los indicadores con un mayor número de simulaciones para obtener resultados más robustos.

### 5.1.5. Objetivo 5: Validar y verificar el sistema.

- **Descripción:** El objetivo final es validar y verificar el sistema desarrollado, asegurando que el modelo y las simulaciones sean correctos y que los resultados obtenidos sean coherentes con la realidad o con estudios previos.
- **Evaluación:** Este objetivo está en fase inicial. La validación y verificación del sistema no se ha completado por completo, ya que se necesita comparar los resultados de las simulaciones con datos reales o con estudios existentes para asegurar la validez del modelo. Esta tarea se llevará a cabo una vez que los prototipos y las simulaciones hayan alcanzado un nivel de madurez mayor.

### 5.1.6. Conclusión sobre los Objetivos

En general, los objetivos del TFG han avanzado de manera satisfactoria, pero aún queda trabajo por hacer en áreas clave como la complejidad de los modelos, la implementación del sistema de visualización del flujo de vehículos, y la realización de un número adecuado de réplicas para asegurar la fiabilidad de los resultados. La validación del sistema será una parte crítica del proyecto que se

llevará a cabo una vez que se hayan completado las simulaciones más exhaustivas. Los avances logrados hasta el momento han proporcionado una base sólida para continuar con el desarrollo y análisis detallado de la red de transporte y el flujo de vehículos.

### 5.2. Trabajos a futuro

- **Integración con datos en tiempo real:** Ampliar el modelo empírico para integrar datos en tiempo real, como información de sensores o sistemas de GPS, con el fin de predecir y mitigar interrupciones en tiempo casi real.
- **Estudio de escenarios más complejos:** Incluir aspectos adicionales, como el impacto de decisiones individuales de los conductores (teoría de juegos aplicada al tráfico) o interrupciones provocadas por factores externos, como desastres naturales o eventos masivos.
- **Optimización basada en simulación:** Desarrollar una capa de optimización que, a partir de los resultados de las simulaciones, sugiera acciones correctivas, como la modificación de rutas alternativas o la priorización de semáforos en áreas clave.
- **Ampliación del modelo a nivel urbano:** Extender el modelo para analizar redes de transporte completas de ciudades grandes, considerando las interacciones entre diferentes modos de transporte (vehículos particulares, transporte público, bicicletas, etc.).
- **Análisis económico y social:** Evaluar el impacto económico de las interrupciones y las medidas correctivas sugeridas, así como su aceptación por parte de los usuarios del sistema de transporte.
- **Uso de inteligencia artificial:** Incorporar técnicas de aprendizaje automático para identificar patrones en las interrupciones y proponer estrategias de mitigación adaptativas basadas en datos históricos.

### 5.3. Evaluación personal del proceso de realización del TFG

El proceso de realización de este TFG ha sido una experiencia tanto desafiante como enriquecedora. A lo largo de las diferentes fases del proyecto, he podido aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera, al igual que aprender nuevos como R o LaTeX y, al mismo tiempo, enfrentarme a nuevos retos relacionados con la simulación de redes de transporte y el análisis de sensibilidad del flujo vehicular.

#### 5.3.1. Fases del proyecto

Desde el inicio, me propuse un enfoque estructurado para abordar los diferentes objetivos del TFG, lo cual me permitió, junto con la ayuda de mi tutor, tener un

## Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro

---

plan claro de trabajo. Las fases iniciales, como la definición del problema y la documentación de las variables, fueron fundamentales para sentar las bases de la simulación. Sin embargo, a medida que avanzaba en la implementación y simulación de los modelos, me di cuenta de la complejidad de los cálculos y la necesidad de ajustar y revisar ciertos parámetros para que los resultados fueran más precisos.

### 5.3.2. Dificultades encontradas

Una de las mayores dificultades fue la gestión del tiempo. Aunque inicialmente tenía un plan bien definido, a medida que avanzaba en la simulación y el análisis de los resultados, me encontré con imprevistos que requerían más tiempo del previsto. Por ejemplo, la integración de las diferentes variables y la creación de un modelo que reflejara de manera precisa las interrupciones aleatorias del tráfico presentó varias complicaciones técnicas. Además, el análisis de la sensibilidad y la estimación de los indicadores de rendimiento resultaron ser tareas más complejas de lo que inicialmente había anticipado.

### 5.3.3. Aprendizajes adquiridos

A pesar de los retos, este proceso ha sido muy educativo. He aprendido a gestionar mejor mi tiempo, sobre todo a ser más realista en la estimación de los tiempos de trabajo. Además, he ganado muchos conocimientos en el uso de herramientas de simulación, programación en R y análisis de datos, lo cual ha sido esencial para llevar a cabo este TFG. También he adquirido una mejor comprensión sobre la importancia de validar los modelos y realizar simulaciones con diversas configuraciones para obtener resultados robustos.

Además, el trabajo en equipo con mi tutor me ha permitido recibir retroalimentación muy útil y realizar ajustes importantes en el enfoque del proyecto. La colaboración constante me ha ayudado a ver el proyecto desde diferentes perspectivas y a mejorar la calidad del trabajo final.

## 5.4. Impacto

### 5.4.1. Impactos en los distintos niveles

- **Personal:** El desarrollo de este TFG me ha supuesto un crecimiento significativo en mis habilidades técnicas, como la simulación computacional y el análisis de resultados, así como otras competencias importantes, como pueden ser la gestión del tiempo y la toma de decisiones basada en datos. También el aprendizaje de nuevas tecnologías desconocidas para mí como Overleaf [14], R [1] y [8], mencionadas previamente en la sección de desarrollo, las cuales podrían llegar a serme útiles en el futuro.
- **Empresarial:** Los resultados de este trabajo pueden ser muy útiles para empresas del sector del transporte, ya que podrían así identificar y mitigar los efectos de interrupciones aleatorias en las redes de tráfico. Esto podría

traducirse en una optimización de recursos, reducción de tiempos de viaje y mejora de la eficiencia operativa. Sin embargo, su implementación podría requerir inversiones iniciales en tecnología, las cual, no todas las empresas estarían dispuestas a hacer ya sea por el repudio a nuevas tecnologías o el hecho de la no capacidad económica de estas como pudiera ser casos de por ejemplo ayuntamientos con bajo presupuesto.

- **Social:** Desde un punto de vista social, las mejoras en la gestión del tráfico tienen el potencial de reducir la congestión urbana, lo que puede contribuir a una mejor calidad de vida para los ciudadanos. Menores tiempos de desplazamiento y una planificación más eficiente del tráfico también fomentan la accesibilidad a servicios básicos y oportunidades laborales. También como se menciono en los trabajos previos, la afectación a la salud mental de las personas que tengan que hacer desde desplazamientos esporadicos, como a en una mayor afectación a las personas que habitualmente hacen desplazamientos
- **Económico:** La optimización del tráfico puede tener efectos positivos en la economía al reducir costes asociados al tiempo perdido en congestión y al consumo innecesario de combustible. También podría estimular sectores relacionados, como la logística y el transporte público. E incluso reutilizando lo dicho en el punto anteriores relacionado con la salud mental, podría así ahorrarse psicólogos privados en caso de no tener un acceso rápido por la sanidad pública.
- **Medioambiental:** Una mejor gestión del tráfico podría disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reducir los tiempos de inactividad de los vehículos y optimizar las rutas. Pese a las nuevas tecnologías de motorización de vehículos de gasolina que cuentan con un sistema de apaaado automatico del motor(Start and Stop) en caso de detener el coche, sumado a las nuevas motorizaciones de vehículos eléctricos como híbridos, esto permitiría en caso de encontrarte frente a una interrupción, un ahorro considerable de emisiones. Este aspecto contribuye directamente al cumplimiento de objetivos medioambientales globales. Sin embargo, existe el riesgo de que, en ausencia de medidas complementarias, podrían llegar a hacer que fuese inutil todas las medidas tomadas.

### 5.4.2. Impacto desarrollo sostenible

El proyecto está alineado con varios ODS de la Agenda 2030, entre ellos:

- ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura, al proponer soluciones tecnológicas que mejoran la infraestructura de transporte.
- ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles, al promover una movilidad urbana más eficiente y sostenible.
- ODS 13: Acción por el Clima, al contribuir a la reducción de emisiones contaminantes derivadas del tráfico.

### 5.5. Análisis del Impacto Potencial de los Resultados

#### 5.5.1. Beneficios esperados

- Desarrollo de herramientas y modelos capaces de mejorar la gestión del tráfico, reduciendo interrupciones aleatorias y optimizando el flujo vehicular.
- Aumento de la eficiencia en la planificación del transporte, permitiendo a administraciones públicas y empresas tomar decisiones informadas basadas en simulaciones fiables.
- Reducción de tiempos de desplazamiento, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos al disminuir el estrés asociado a los atascos y maximizando el tiempo útil para otras actividades.
- Contribución a la disminución del consumo de combustible, lo que no solo beneficia al medio ambiente, sino también a los usuarios, reduciendo sus costes asociados al transporte.
- Posibilidad de aplicar los modelos y herramientas desarrollados a diferentes contextos, como la logística empresarial, la movilidad urbana o la planificación de eventos masivos, aportando soluciones prácticas y adaptables.
- Posible mejora de la seguridad vial, al reducir situaciones de riesgo causadas por congestiones inesperadas o interrupciones críticas en el flujo vehicular.
- Ahorro de tiempo de los desplazamientos que mejoraría sustancialmente la eficiencia en la entrega de mercancías, ahorro de así los costes que esto conlleva.
- Mejora en la salud mental por el ahorro del impacto que tiene en las personas estar detenido en un atasco de manera habitual.

#### 5.5.2. Posibles efectos adversos

- Las soluciones propuestas podrían requerir inversiones iniciales elevadas, tanto en la adquisición de software y hardware como en la capacitación del personal encargado de implementarlas, cosa la cual podría hacer que como se ha mencionado antes, no todas las empresas o entes públicos se lo puedan permitir.
- Existe la posibilidad de que los beneficios no se distribuyan de manera equitativa, favoreciendo a áreas urbanas con mejor infraestructura en detrimento de zonas rurales o menos desarrolladas, pero sin embargo acorde a esto habría que tener en cuenta que la distribución de las interrupciones serían bastante inferiores debido a la menor afluencia de vehículos, sin embargo aquellas que ocurren debido a eventos naturales serían más habituales debido a la peor preparación de las vías para ello.

## **5.5. Análisis del Impacto Potencial de los Resultados**

---

- La implementación de estas soluciones podría generar conflictos de intereses entre los diferentes partes involucradas, como administraciones públicas, empresas privadas y ciudadanos.
- Sin políticas complementarias, una mayor fluidez del tráfico podría incentivar un uso excesivo del vehículo privado, aumentando la dependencia de este medio de transporte en lugar de reducirla.
- La aceptación de las soluciones tecnológicas puede encontrar resistencia por parte de grupos que desconfían de los avances tecnológicos o que no perciben de inmediato los beneficios.
- Dependencia de recursos tecnológicos o infraestructuras específicas que podrían no estar disponibles en todas las regiones, limitando la aplicabilidad de las soluciones.



# Bibliografía

- [1] R. Team, *RStudio: Integrated Development Environment for R*, RStudio, PBC, Boston, MA, 2021. [Online]. Available: <https://www.rstudio.com/>
- [2] K. Nagel and M. Schreckenberg, "A cellular automaton model for freeway traffic," *Journal de Physique I*, vol. 2, no. 12, pp. 2221–2229, 1992.
- [3] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959.
- [4] E. T. Verhoef, J. Rouwendal, and K. A. Small, "Network congestion and bottleneck externalities," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 134, pp. 76–88, 2020.
- [5] D. Kim, Y. Ahn, and E. Park, "Association between commuting time and depressive symptoms in the 5th korean working conditions survey," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 13, p. 4684, 2020.
- [6] R. Santibáñez, "Inteligencia artificial: Reflexión sobre sus implicaciones en la sociedad, la economía y el empleo," *DEUSTO Social Impact Briefings*, no. 4, 2019.
- [7] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing, "The intelligent driver model: Analysis and application to adaptive cruise control," *Physical Review E*, vol. 62, no. 2, pp. 1805–1824, 2000.
- [8] O. L. Jones, R. Maillardet, and A. Robinson, *Introduction to Scientific Programming and Simulation Using R*, 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, 2014.
- [9] H. Wickham, *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016. [Online]. Available: <https://ggplot2.tidyverse.org>
- [10] J. A. Sokolowski and C. M. Banks, *Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach*. John Wiley & Sons, 2010.
- [11] H. e. a. Wickham, "Tidyverse: An ecosystem of packages for data science in r," 2019. [Online]. Available: <https://www.tidyverse.org>
- [12] H. Zhang, Y. Liu, and B. Liu, "Research on visualization of multi-dimensional real-time traffic data stream based on cloud computing," *Journal of Computer and Communications*, vol. 2, no. 11, pp. 71–76, 2014.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [13] M. García García and J. López Martínez, “Análisis de la comunicación en las organizaciones: un estudio de caso en la universidad complutense de madrid,” *Revista de Comunicación Organizacional*, vol. 15, no. 2, pp. 45–67, 2023. [Online]. Available: <https://docta.ucm.es/entities/publication/2ed8433b-400f-4812-85ac-0ad39dba9840>
- [14] “Latex.” [Online]. Available: <https://es.overleaf.com/>

# **Anexos**



# Apéndice A

## Anexo

Como anexo, hemos decidido anexar el código del programa con el que se ha realizado la simulación y el cual serviría para una futura mejora con implementación de más variables o componentes, como bien se ha explicado antes:

El código consta de tres Scripts de R, los cuales son: el bucle principal con el cálculo de varios datos y gráficas, el cual fue el presentado en la entrega intermedia, el cual calcula y genera las gráficas 4.2 y 4.1:

```
1 if (!require(tidyverse)) install.packages("tidyverse", dependencies = TRUE)
2 library(tidyverse)
```

Listing A.1: Carga de librerías necesarias

```
1 num_vehiculos_inicial <- 20      # Vehículos iniciales en la red
2 llegadas_por_minuto <- 1        # Vehículos que llegan por minuto (Poisson)
3 duracion_simulacion <- 1000    # Duración total de la simulación en segundos
4 probabilidad_interrupcion <- 0.1 # Probabilidad de interrupción
5 duracion_interrupcion <- 50     # Duración promedio de una interrupción en
  segundos
```

Listing A.2: Definición de parámetros básicos de la simulación

```
1 nodos <- data.frame(id = 1:5,
2                   x = c(0, 1, 3, 6, 8), # Coordenadas X
3                   y = c(0, 1, 2, 2, 0)) # Coordenadas Y
4
5 caminos <- data.frame(
6   from = c(1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 4, 5, 5, 5, 5),
7   to =   c(2, 3, 4, 5, 1, 3, 4, 5, 1, 2, 4, 5, 1, 2, 3, 5, 1, 2, 3, 4),
8   distancia = c(300, 250, 400, 350, 300, 500, 450, 200, 250, 500, 250, 550,
9                 400, 450, 250, 800, 350, 200, 550, 800),
10  tiempo_base = c(10, 8, 15, 12, 10, 16, 15, 6, 8, 16, 8, 18, 15, 15, 8, 20,
11                 12, 6, 18, 20)
```

Listing A.3: Definición de la red de nodos y caminos

## Capítulo A. Anexo

```
1 generar_interrupciones <- function(caminos) {
2   for (i in 1:nrow(caminos)) {
3     if (runif(1) < probabilidad_interrupcion) {
4       caminos$tiempo_base[i] <- caminos$tiempo_base[i] + rexp(1, rate = 1 /
5         duracion_interrupcion)
6     }
7   }
8   return(caminos)
9 }
```

Listing A.4: Función para generar interrupciones en los caminos de manera aleatoria

```
1 calcular_ruta_dijkstra <- function(origen, destino, caminos) {
2   nodos_visitados <- c(origen)
3   distancia_minima <- rep(Inf, max(caminos$to))
4   distancia_minima[origen] <- 0
5
6   while (!destino %in% nodos_visitados) {
7     nodos_no_visitados <- setdiff(unique(c(caminos$from, caminos$to)),
8       nodos_visitados)
9     if (length(nodos_no_visitados) == 0) return(NA) # No hay más nodos
10      disponibles
11
12     nodos_adyacentes <- caminos %>% filter(from %in% nodos_visitados, to %in%
13       nodos_no_visitados)
14
15     if (nrow(nodos_adyacentes) == 0) return(NA) # No hay caminos disponibles
16
17     for (i in 1:nrow(nodos_adyacentes)) {
18       nodo_actual <- nodos_adyacentes$to[i]
19       nueva_distancia <- distancia_minima[nodos_adyacentes$from[i]] +
20         nodos_adyacentes$tiempo_base[i]
21       if (nueva_distancia < distancia_minima[nodo_actual]) {
22         distancia_minima[nodo_actual] <- nueva_distancia
23       }
24     }
25     nodo_proximo <- which.min(distancia_minima[nodos_no_visitados])
26     nodos_visitados <- c(nodos_visitados, nodos_no_visitados[nodo_proximo])
27   }
28
29   return(distancia_minima[destino])
30 }
```

Listing A.5: Algoritmo de Dijkstra para la ruta más corta, para que en caso de corte el vehículo sepa por donde ir

```
1 # Calcular la posición intermedia de un vehículo entre dos nodos
2 calcular_posicion <- function(origen, destino, tiempo_viaje, caminos) {
3   # Obtener la distancia total entre el origen y destino
4   camino <- caminos %>% filter(from == origen, to == destino)
5   distancia_total <- camino$distancia
6
7   # Proporción del trayecto que ha recorrido el vehículo
8   proporcion_recorrido <- tiempo_viaje / camino$tiempo_base
9
10  # Coordenadas de origen y destino
```

```

11  origen_x <- nodos$x[nodos$id == origen]
12  origen_y <- nodos$y[nodos$id == origen]
13  destino_x <- nodos$x[nodos$id == destino]
14  destino_y <- nodos$y[nodos$id == destino]
15
16  # Cálculo de la posición intermedia
17  x_posicion <- origen_x + proporcion_recorrido * (destino_x - origen_x)
18  y_posicion <- origen_y + proporcion_recorrido * (destino_y - origen_y)
19
20  return(c(x = x_posicion, y = y_posicion))
21 }

```

Listing A.6: Función para calcular la posición de un vehículo entre los nodos

```

1  simular_trafico <- function(num_vehiculos_inicial, llegadas_por_minuto,
2     caminos, duracion_simulacion) {
3     vehiculos <- data.frame(
4         id = 1:num_vehiculos_inicial,
5         origen = sample(nodos$id, num_vehiculos_inicial, replace = TRUE),
6         destino = sample(nodos$id, num_vehiculos_inicial, replace = TRUE),
7         tiempo_llegada = rep(0, num_vehiculos_inicial),
8         tiempo_salida = NA,
9         tiempo_viaje = NA,
10        x_posicion = NA,
11        y_posicion = NA,
12        desvio = rep(0, num_vehiculos_inicial), # Nueva columna de desvíos
13        tiempo_desvio = rep(0, num_vehiculos_inicial) # Nueva columna de tiempo
14        adicional por desvíos
15    )
16 }

```

Listing A.7: Simulación del tráfico con seguimiento de vehículos para hacer el muestreo de posiciones con la ejecución del bucle

```

1  for (i in 1:num_vehiculos_inicial) {
2     nodo_origen <- vehiculos$origen[i]
3     vehiculos$x_posicion[i] <- nodos$x[nodos$id == nodo_origen]
4     vehiculos$y_posicion[i] <- nodos$y[nodos$id == nodo_origen]
5  }

```

Listing A.8: Asignación de la posición inicial para evitar valores nulos

```

1  while (tiempo_actual < duracion_simulacion) {
2     caminos <- generar_interrupciones(caminos) # Actualizar interrupciones
3
4     # Calcular tiempos de viaje para vehículos en espera
5     for (i in 1:nrow(vehiculos)) {
6         if (is.na(vehiculos$tiempo_viaje[i])) {
7             if (vehiculos$origen[i] != vehiculos$destino[i]) {
8                 tiempo_viaje <- calcular_ruta_dijkstra(vehiculos$origen[i],
9                 vehiculos$destino[i], caminos)
10                if (!is.na(tiempo_viaje)) {
11                    vehiculos$tiempo_viaje[i] <- tiempo_viaje
12                    vehiculos$tiempo_salida[i] <- tiempo_actual + tiempo_viaje
13                }
14            } else {
15                vehiculos$tiempo_viaje[i] <- 0
16                vehiculos$tiempo_salida[i] <- tiempo_actual

```

## Capítulo A. Anexo

```
16     }
17   }
18
19   # Verificar interrupciones y aplicar desvíos si es necesario
20   if (runif(1) < probabilidad_interrupcion) {
21     vehiculos$desvio[i] <- vehiculos$desvio[i] + 1 # Incrementar número
      de desvíos
22   }
23
24   # Calcular las posiciones intermedias de los vehículos
25   if (!is.na(vehiculos$tiempo_viaje[i])) {
26     vehiculos_pos <- calcular_posicion(vehiculos$origen[i],
      vehiculos$destino[i], vehiculos$tiempo_viaje[i], caminos)
27     vehiculos$x_posicion[i] <- vehiculos_pos["x"]
28     vehiculos$y_posicion[i] <- vehiculos_pos["y"]
29   }
30 }
31
32 # Registro de vehículos y sus posiciones en este minuto
33 registros_minuto[[length(registros_minuto) + 1]] <- vehiculos %>%
34   mutate(minuto = tiempo_actual / 60) %>%
35   select(minuto, id, origen, destino, tiempo_llegada, x_posicion,
      y_posicion, desvio, tiempo_desvio)
36
37 # Agregar nuevos vehículos
38 vehiculos_entrantes <- rpois(1, llegadas_por_minuto / 60)
39 if (vehiculos_entrantes > 0) {
40   nuevos_vehiculos <- data.frame(
41     id = max(vehiculos$id, na.rm = TRUE) + 1:vehiculos_entrantes,
42     origen = sample(nodos$id, vehiculos_entrantes, replace = TRUE),
43     destino = sample(nodos$id, vehiculos_entrantes, replace = TRUE),
44     tiempo_llegada = tiempo_actual + rexp(vehiculos_entrantes, rate =
      llegadas_por_minuto / 60),
45     tiempo_salida = NA,
46     tiempo_viaje = NA,
47     x_posicion = NA,
48     y_posicion = NA,
49     desvio = rep(0, vehiculos_entrantes), # Iniciar con 0 desvíos
50     tiempo_desvio = rep(0, vehiculos_entrantes) # Iniciar con 0 tiempo de
      desvío
51   )
52   vehiculos <- rbind(vehiculos, nuevos_vehiculos)
53 }
54
55 tiempo_actual <- tiempo_actual + 60 # Avanzar tiempo en minutos
56 }
57
58 # Convertir la lista de registros a un solo data frame
59 resultado <- bind_rows(registros_minuto)
60
61 # Guardar los resultados en un archivo CSV
62 write.csv(resultado, "resultados_simulacion.csv", row.names = FALSE)
63
64 return(resultado)
65 }
```

Listing A.9: Ejecucion del bucle de simulación con escritura de los resultados en un csv

```

1 resultados_simulacion <- simular_trafico(num_vehiculos_inicial,
    llegadas_por_minuto, caminos, duracion_simulacion)

```

Listing A.10: Calculo de todas las funciones en base al bucle

```

1
2 # Gráfico del número de vehículos en cada nodo a lo largo del tiempo
3 vehiculos_en_nodos <- resultados_simulacion %>%
4   group_by(minuto, origen) %>%
5   summarise(num_vehiculos = n(), .groups = 'drop')
6
7 ggplot(vehiculos_en_nodos, aes(x = minuto, y = num_vehiculos, color =
8   factor(origen))) +
9   geom_line() +
10  theme_minimal() +
11  labs(title = "Número de vehículos en cada nodo a lo largo del tiempo", x =
12     "Minuto", y = "Número de vehículos") +
13  scale_color_discrete(name = "Nodo de origen")
14
15 # Gráfico del número de vehículos desviados a lo largo del tiempo
16 vehiculos_desviados <- resultados_simulacion %>%
17   filter(desvio > 0) %>%
18   group_by(minuto, desvio) %>%
19   summarise(num_vehiculos_desviados = n(), .groups = 'drop')
20
21 ggplot(vehiculos_desviados, aes(x = minuto, y = num_vehiculos_desviados, color
22   = factor(desvio))) +
23   geom_line() +
24   theme_minimal() +
25   labs(title = "Número de vehículos desviados a lo largo del tiempo", x =
26     "Minuto", y = "Número de vehículos desviados") +
27   scale_color_discrete(name = "Número de desvíos")
28
29 # Gráfico del tiempo de desvío acumulado por vehículo
30 ggplot(resultados_simulacion, aes(x = minuto, y = tiempo_desvio, group = id,
31   color = factor(id))) +
32   geom_line() +
33   theme_minimal() +
34   labs(title = "Tiempo de desvío acumulado por vehículo", x = "Minuto", y =
35     "Tiempo de desvío (segundos)") +
36   scale_color_discrete(name = "ID Vehículo")

```

Listing A.11: Gráficos de análisis de resultados

## Capítulo A. Anexo

También existe otro Script, el cual calcula el tiempo perdido entre el óptimo y el real, el número de vehículos que se vieron obligados a tomar un desvío y, por último, el número de vehículos que se encuentran en cada instante en los nodos y que genera la gráfica 4.6:

```
1 calcular_tiempo_optimo <- function(origen, destino, caminos) {
2   nodos_visitados <- c(origen)
3   distancia_minima <- rep(Inf, max(caminos$to))
4   distancia_minima[origen] <- 0
5
6   while (!destino %in% nodos_visitados) {
7     nodos_no_visitados <- setdiff(unique(c(caminos$from, caminos$to)),
8                                   nodos_visitados)
9     if (length(nodos_no_visitados) == 0) return(NA)
10
11    nodos_adyacentes <- caminos %>% filter(from %in% nodos_visitados, to %in%
12                                           nodos_no_visitados)
13
14    if (nrow(nodos_adyacentes) == 0) return(NA)
15
16    for (i in 1:nrow(nodos_adyacentes)) {
17      nodo_actual <- nodos_adyacentes$to[i]
18      nueva_distancia <- distancia_minima[nodos_adyacentes$from[i]] +
19        nodos_adyacentes$tiempo_base[i]
20      if (nueva_distancia < distancia_minima[nodo_actual]) {
21        distancia_minima[nodo_actual] <- nueva_distancia
22      }
23    }
24
25    nodo_proximo <- which.min(distancia_minima[nodos_no_visitados])
26    nodos_visitados <- c(nodos_visitados, nodos_no_visitados[nodo_proximo])
27  }
28
29  return(distancia_minima[destino])
30 }
```

Listing A.12: Función para calcular el tiempo óptimo usando Dijkstra (sin interrupciones)

```
1 resultados_comparacion <-
2   simular_trafico_con_comparacion(num_vehiculos_inicial,
3   llegadas_por_minuto, caminos, duracion_simulacion)
4
5 # Verificar los primeros resultados
6 print(head(resultados_comparacion))
```

Listing A.13: Ejecución de la simulación con comparación de tiempos basado en el bucle mencionado antes

```
1 # Filtrar valores válidos antes de graficar
2 resultados_validos <- resultados_comparacion %>%
3   filter(!is.na(tiempo_total_viaje) & !is.na(tiempo_optimo))
4
5 # Gráfico comparando tiempo real vs. tiempo óptimo por vehículo
6 ggplot(resultados_validos, aes(x = minuto)) +
7   geom_line(aes(y = tiempo_total_viaje, color = "Tiempo Real")) +
8   geom_line(aes(y = tiempo_optimo, color = "Tiempo Óptimo"), linetype =
9     "dashed") +
```

```
8 | facet_wrap(~ id, scales = "free_y") +
9 | theme_minimal() +
10 | labs(title = "Comparación del Tiempo de Viaje Real vs. Óptimo por Vehículo",
11 |       x = "Minuto",
12 |       y = "Tiempo de Viaje (segundos)") +
13 | scale_color_manual(name = "Tipo de Tiempo", values = c("Tiempo Real" =
    "red", "Tiempo Óptimo" = "blue"))
```

Listing A.14: Gráficos de comparación de tiempos reales y óptimos incluyendo la exclusion de resultados no validos

## Capítulo A. Anexo

Y por último, el script que calcula la distancia al nodo más cercano, para demostrar que hay un cierto movimiento de los vehículos y que genera la gráfica 4.5

```
1  simular_trafico <- function(num_vehiculos_inicial, llegadas_por_minuto,
2    caminos, duracion_simulacion) {
3    vehiculos <- data.frame(
4      id = 1:num_vehiculos_inicial,
5      origen = sample(nodos$id, num_vehiculos_inicial, replace = TRUE),
6      destino = sample(nodos$id, num_vehiculos_inicial, replace = TRUE),
7      tiempo_llegada = rep(0, num_vehiculos_inicial),
8      tiempo_salida = NA,
9      tiempo_viaje = NA,
10     x_posicion = NA,
11     y_posicion = NA,
12     nodo_actual = NA,
13     nodo_destino = NA,
14     distancia_nodo_cercano = NA
15   )
16   # Asignar posiciones iniciales según el nodo de origen
17   for (i in 1:num_vehiculos_inicial) {
18     nodo_origen <- vehiculos$origen[i]
19     nodo_destino <- sample(nodos$id[nodos$id != nodo_origen], 1)
20
21     vehiculos$nodo_actual[i] <- nodo_origen
22     vehiculos$nodo_destino[i] <- nodo_destino
23     vehiculos$x_posicion[i] <- nodos$x[nodos$id == nodo_origen]
24     vehiculos$y_posicion[i] <- nodos$y[nodos$id == nodo_origen]
25     vehiculos$distancia_nodo_cercano[i] <-
26       calcular_distancia_nodo_cercano(vehiculos$x_posicion[i],
27         vehiculos$y_posicion[i], nodos)
28   }
29
30   tiempo_actual <- 0
31   registros_minuto <- list()
32
33   while (tiempo_actual < duracion_simulacion) {
34     caminos <- generar_interrupciones(caminos) # Actualizar interrupciones
35
36     for (i in 1:nrow(vehiculos)) {
37       nodo_actual <- vehiculos$nodo_actual[i]
38       nodo_destino <- vehiculos$nodo_destino[i]
39
40       # Obtener coordenadas de origen y destino
41       x_origen <- nodos$x[nodos$id == nodo_actual]
42       y_origen <- nodos$y[nodos$id == nodo_actual]
43       x_destino <- nodos$x[nodos$id == nodo_destino]
44       y_destino <- nodos$y[nodos$id == nodo_destino]
45
46       # Tiempo total necesario para recorrer el camino
47       tiempo_total <- caminos %>% filter(from == nodo_actual, to ==
48         nodo_destino) %>% pull(tiempo_base)
49       if (length(tiempo_total) == 0) next
50
51       # Calcular la nueva posición
52       tiempo_recorrido <- tiempo_actual %% tiempo_total
53       nueva_posicion <- calcular_posicion_intermedia(tiempo_recorrido,
```

```

    tiempo_total, x_origen, y_origen, x_destino, y_destino)
51
52 vehiculos$x_posicion[i] <- nueva_posicion[1]
53 vehiculos$y_posicion[i] <- nueva_posicion[2]
54 vehiculos$distancia_nodo_cercano[i] <-
    calcular_distancia_nodo_cercano(vehiculos$x_posicion[i],
    vehiculos$y_posicion[i], nodos)
55
56 # Si ha llegado al destino, asignarle una nueva ruta
57 if (tiempo_recorrido >= tiempo_total) {
58   vehiculos$nodo_actual[i] <- nodo_destino
59   nuevo_destino <- sample(nodos$id[nodos$id != nodo_destino], 1)
60   vehiculos$nodo_destino[i] <- nuevo_destino
61 }
62 }
63
64 registros_minuto[[length(registros_minuto) + 1]] <- vehiculos %>%
65   mutate(minuto = tiempo_actual / 60) %>%
66   select(minuto, id, origen, destino, x_posicion, y_posicion,
    distancia_nodo_cercano)
67
68 tiempo_actual <- tiempo_actual + 60 # Avanzar tiempo en minutos
69 }
70
71 resultado <- bind_rows(registros_minuto)
72
73 # Guardar los resultados en un archivo CSV
74 write.csv(resultado, "resultados_simulacion_distancias.csv", row.names =
    FALSE)
75
76 return(resultado)
77 }

```

Listing A.15: Simulación de tráfico con seguimiento de vehículos y cálculo de distancia al nodo más cercano y escritura en el csv correspondiente

```

1 resultados_simulacion <- simular_trafico(num_vehiculos_inicial,
    llegadas_por_minuto, caminos, duracion_simulacion)

```

Listing A.16: Ejecución de la simulación de tráfico para obtener los resultados


```

1 # Gráfico de distancia al nodo más cercano a lo largo del tiempo
2 ggplot(resultados_simulacion, aes(x = minuto, y = distancia_nodo_cercano,
    group = id, color = factor(id))) +
3   geom_line() +
4   theme_minimal() +
5   labs(title = "Distancia al nodo más cercano a lo largo del tiempo", x =
    "Minuto", y = "Distancia (metros)") +
6   scale_color_discrete(name = "ID Vehículo")

```

Listing A.17: Gráfico de distancia al nodo más cercano a lo largo del tiempo

Este documento esta firmado por



<b>Firmante</b>	CN=tfgm.fi.upm.es, OU=CCFI, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
<b>Fecha/Hora</b>	Tue Jan 28 16:18:41 CET 2025
<b>Emisor del Certificado</b>	EMAILADDRESS=camanager@etsiinf.upm.es, CN=CA ETS Ingenieros Informaticos, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
<b>Numero de Serie</b>	561
<b>Metodo</b>	urn:adobe.com:Adobe.PPKLite:adbe.pkcs7.sha1 (Adobe Signature)