

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Máster en Métodos Formales en Ingeniería Informática

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estudio de modelos de tráfico

Autor: Álvaro Rodríguez Palacios

Tutor: Fernando Rubio Díez e Ismael Rodríguez Laguna

Septiembre 2023

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con la autorización de los titulares de la propiedad intelectual.
La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (*arts. 270 y sgts. del Código Penal*).

DERECHOS RESERVADOS

© Septiembre 2023 por UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
Francisco Tomás y Valiente, nº 1
Madrid, 28049
Spain

Álvaro Rodríguez Palacios
Estudio de modelos de tráfico

Álvaro Rodríguez Palacios
C\ Francisco Tomás y Valiente N° 11

IMPRESO EN ESPAÑA – PRINTED IN SPAIN

RESUMEN

Este estudio explora las interacciones entre diferentes estilos de conducción y cómo estos afectan la eficiencia y seguridad del tráfico con diferentes tipos de conductores en situaciones de tráfico variables, haciendo énfasis en la influencia de los distintos estilos de conducción, en la dinámica del tráfico y la seguridad vial.

Mediante el uso de un modelo de simulación de tráfico simple, se analiza la eficacia y rendimiento de los conductores en diferentes escenarios, evaluando cómo ciertos estilos de conducción pueden ser más eficientes y seguros que otros, dependiendo de las condiciones de la carretera y el tráfico, para determinar cómo las interacciones entre diferentes estilos de conducción pueden afectar el flujo vehicular y la seguridad vial.

Los resultados muestran que, si bien los conductores agresivos pueden a priori parecer eficientes individualmente, su presencia en combinación con conductores de otros estilos puede desencadenar una mayor tasa de accidentes y disminuir la eficiencia general del sistema, no solo en términos de tiempo individual, sino en la cantidad de vehículos que pueden pasar por un punto en un período de tiempo determinado. Estos hallazgos ofrecen perspectivas valiosas para tener en cuenta en futuras investigaciones y políticas de tráfico, y subrayan la importancia de entender la dinámica de diferentes estilos de conducción en la planificación y gestión del tráfico.

PALABRAS CLAVE

Estilos de conducción, simulación de tráfico, seguridad vial, seguridad vehicular, eficiencia del tráfico

ABSTRACT

This study delves into the interactions between various driving styles and how these influence the efficiency and safety of traffic with diverse driver types in fluctuating traffic situations. Emphasis is laid on understanding the influence of different driving behaviors on traffic dynamics and road safety.

Through the use of a basic traffic simulation model, the effectiveness and performance of drivers in different scenarios are analyzed. This evaluation discerns how certain driving styles might be more efficient and safe than others, contingent upon road and traffic conditions. The aim is to determine how interactions between various driving styles can impact vehicular flow and road safety.

The findings indicate that, while aggressive drivers may initially seem efficient on an individual basis, their presence in tandem with drivers of other styles can lead to a higher accident rate and decrease the system's overall efficiency. This is not only in terms of individual time but also concerning the number of vehicles that can pass through a point within a specific time frame. These insights provide valuable perspectives to consider in future research and traffic policies and underline the significance of understanding the dynamics of diverse driving styles in traffic planning and management.

KEYWORDS

Driving styles, traffic simulation, road safety, vehicular safety, traffic efficiency

ÍNDICE

1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
2 Marco Teórico	3
2.1 Antecedentes	3
2.2 Conceptos Clave	3
2.3 Modelos Relacionados	4
3 Metodología	5
3.1 Modelo de Simulación al Detalle	5
3.2 Herramientas y Tecnologías	8
3.3 Diseño Experimental	9
3.4 Consideraciones	13
4 Resultados	15
4.1 Resultados de las Simulaciones	15
4.2 Análisis de los Resultados	20
5 Discusión	35
6 Conclusiones y Trabajo Futuro	39
6.1 Conclusiones	39
6.2 Trabajo Futuro	40
Bibliografía	41
Apéndices	43
A Detalles del Modelo y Guía de Uso	45
A.1 Detalles del Modelo	45
A.2 Guía de Uso	47

LISTAS

Lista de algoritmos

3.1	Actualización de velocidad y carril.....	12
3.2	Actualización de la velocidad.....	12
3.3	Actualización del carril.....	13

Lista de ecuaciones

3.1	Tiempo de limpieza de un accidente	8
-----	------------------------------------------	---

Lista de figuras

4.1	Simulaciones exitosas	16
4.2	Porcentaje de accidentes por tipo de conductor.	17
4.3	Mediana de conductores que completaron la simulación	18
4.4	Mediana de tiempos de finalización en función de la configuración.	19
4.5	Resultados para conductores Cautos y Temerarios, separados	21
4.6	Resultados para conductores Cautos y Temerarios, conviviendo 1	22
4.7	Resultados para conductores Cautos y Temerarios, conviviendo 2	22
4.8	Mediana de tiempos y accidentes de conductores Cautos	23
4.9	Resultados para conductores Normales y Agresivos, separados	24
4.10	Resultados para conductores Normales y Agresivos, conviviendo 1	25
4.11	Resultados para conductores Normal y Agresivos, conviviendo 2	25
4.12	Mediana de tiempos y accidentes de conductores Normales.....	26
4.13	Resultados para conductores Arriesgados	27
4.14	Resultados para conductores Arriesgados y Agresivos, conviviendo	27
4.15	Resultados para diferentes conductores, conviviendo	28
4.16	Mediana de tiempos y accidentes de conductores Arriesgados.....	29
4.17	Comparación de tiempos y accidentes por tipo de conductor	30
4.18	Mediana de tiempos y accidentes en diferentes distribuciones	31
4.19	Conductores que terminan en Cautos/Temerarios y Normales/Agresivos	32
A.1	Diagrama de clases del modelo	45

Lista de tablas

3.1	Tipos de conductores	6
3.2	Tipos de tiempos de reacción	6
3.3	Tipos de vehículos	6
3.4	Tipos de conductores	7
3.5	Simulaciones de Estrategias	10

INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En un mundo en que la evolución y el crecimiento urbano se encuentra en constante evolución, las vías de tráfico se han convertido en un elemento fundamental para el desarrollo de las ciudades, y con ello de los actores implicados que las utilizan. Por ello, más allá de la importancia de la infraestructura en sí, es necesario conocer el comportamiento de los usuarios de las vías, y cómo estos afectan a la misma. Los accidentes de tráfico, con sus consecuencias catastróficas en pérdidas humanas, materiales, económicas y de tiempo, se mantienen como una de las principales preocupaciones en metrópolis y carreteras de todo el mundo.

Los conductores, con sus distintas personalidades, habilidades, niveles de seguridad y experiencia, así como el propio vehículo y las condiciones de la vía, son los principales factores que influyen en la seguridad de la misma. Por ello, es necesario conocer cómo puede el comportamiento de estos conductores afectar a la seguridad de la vía, y cómo puede este comportamiento ser modelado para su estudio.

El interés no es nuevo, y se han llevado a cabo múltiples estudios en el pasado que tratan de descifrar los patrones del tráfico vehicular. Sin embargo, en un contexto donde la tecnología permite cada vez más la simulación de escenarios complejos, el análisis detallado de los comportamientos de los conductores en un entorno controlado puede aportar detalles valiosos que permitan comprender y analizar qué escenarios son más propensos a sufrir accidentes y cuáles obtienen mejores resultados en términos de seguridad y tiempo.

1.2 Objetivos

Objetivos Generales

Análisis del comportamiento de los conductores

Profundizar en la comprensión de cómo los distintos tipos de conductores y sus características (como agresividad, prudencia o experiencia) influyen directamente en la dinámica y fluidez del tráfico vehicular.

Evaluación del rendimiento de los conductores

Determinar cuál tipo de conductor, basado en sus características y comportamiento, no solo logra ser eficaz en la conducción a nivel individual, sino que también contribuye positivamente al flujo colectivo.

Contraste entre objetivos individuales y colectivos

Analizar cómo ciertas conductas que pueden ser óptimas para un individuo pueden tener repercusiones negativas en el flujo global, provocando congestiones o incrementando el riesgo de accidentes.

Objetivos Parciales

Desarrollo del modelo de simulación

Crear un entorno virtual que integre las variables y parámetros relevantes que permitan la simulación de diferentes escenarios de tráfico y comportamientos de conductores. Para ello se ha de identificar y categorizar aspectos como el tipo de vehículo y características del conductor (edad, experiencia, nivel de agresividad) que puedan influir en el comportamiento en carretera.

Ejecución de simulaciones

Una vez desarrollado el modelo, llevar a cabo múltiples simulaciones que reflejen distintos escenarios de tráfico, introduciendo variaciones en los tipos de conductores, densidades vehiculares, condiciones de la carretera y otros factores.

Análisis detallado de resultados

Interpretar y evaluar los datos obtenidos de las simulaciones para determinar qué tipo de conductor o conjunto de conductores contribuye de manera más eficaz al flujo vehicular y a la seguridad vial.

Implicaciones prácticas

Basado en los hallazgos, identificar recomendaciones y sugerencias que puedan ayudar en la formulación de políticas de tráfico y educación vial, con el objetivo de mejorar la experiencia de conducción y reducir los riesgos asociados.

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

El estudio del tráfico y el comportamiento de los conductores ha sido un área de interés desde hace décadas. Los modelos de tráfico, especialmente aquellos que consideran dinámicas y comportamientos humanos, ofrecen una comprensión profunda de cómo las carreteras y las infraestructuras se utilizan y, más importante aún, cómo pueden mejorarse para garantizar la seguridad y eficiencia. La literatura histórica en el campo ha establecido firmemente la importancia de entender el flujo de tráfico y las condiciones que conducen a atascos [1–3].

Además, con el aumento de la urbanización y el incremento del tráfico vehicular, comprender la naturaleza y causas de los accidentes se ha vuelto fundamental. En general, los accidentes de tráfico representan una causa significativa de muerte no natural en el mundo, lo que refuerza la importancia de estudiar el comportamiento del conductor [4, 5].

2.2 Conceptos Clave

Tipos de conductores

Una dimensión crítica en el estudio del comportamiento del conductor es la tipificación basada en su agresividad o cautela. Estos tipos varían desde conductores extremadamente cautos hasta aquellos altamente agresivos [6]. La agresividad en la conducción puede manifestarse de varias maneras, desde actos deliberados de hostilidad hasta comportamientos imprudentes que ponen en riesgo la seguridad propia y la de los demás [7]. La personalidad y las actitudes individuales también juegan un papel fundamental en la percepción del riesgo y el comportamiento al volante [8].

Comportamiento agresivo y conducción arriesgada

El comportamiento agresivo al volante a menudo se correlaciona con actitudes y comportamientos de riesgo. Estos comportamientos no solo ponen en peligro al conductor agresivo, sino también a otros

usuarios de la carretera. El enojo y la agresión, por ejemplo, pueden influir considerablemente en la toma de decisiones y la percepción del riesgo al conducir [9].

2.3 Modelos Relacionados

Teoría del tráfico

Las teorías clásicas del tráfico, como las presentadas por Leutzbach [1] y Daganzo [2], ofrecen un marco para entender cómo los vehículos se mueven en las carreteras y cómo se desarrollan situaciones como atascos y congestiones.

Simulación de tráfico

Para poder evaluar el impacto de diferentes conductores en el flujo de tráfico, se han desarrollado diversos modelos de simulación [10, 11]. Estos modelos permiten analizar escenarios específicos, replicando las dinámicas reales del tráfico y permitiendo la introducción de diferentes variables. Una de las aplicaciones modernas de la simulación de tráfico es el uso de metaheurísticas, como algoritmos genéticos, para optimizar los sistemas de control de tráfico [12].

METODOLOGÍA

3.1 Modelo de Simulación al Detalle

Premisas Generales

Puesto que el objetivo del modelo es analizar el comportamiento de los conductores en un entorno controlado, es necesario definir un conjunto de premisas generales que permitan la simulación de escenarios realistas -si bien no excesivamente complejos, puesto que con un modelo simple es posible obtener resultados valiosos- de los cuales se puedan extraer conclusiones relevantes.

La representatividad y precisión de los datos obtenidos de las simulaciones es fundamental para poder realizar un análisis detallado y extraer conclusiones válidas. Por ello, es necesario que el modelo sea capaz de simular escenarios que reflejen fielmente las condiciones reales de las carreteras, incluyendo factores como la densidad vehicular, la velocidad, la distancia de seguridad, la agresividad de los conductores, diferentes tipos de vehículos y los tiempos de reacción, obviando factores como el clima o el estado de la carretera, que pueden influir en el comportamiento de los conductores pero que no son relevantes para el propósito del modelo, además de ser más difíciles de simular.

Tipos de Conductores

Como se mencionó en la sección 2.1, existen diferentes tipos de conductores, que varían desde los más cautos hasta los más agresivos. Para poder realizar un análisis detallado, es necesario definir un conjunto de tipos de conductores que permitan representar la diversidad de comportamientos que se pueden observar en las carreteras. En este caso, se han definido cinco tipos de conductores, que se describen en la tabla 3.1.

Respecto a la velocidad máxima establecida, que dependerá de cada vehículo y que se puede consultar en la tabla 3.3, se han considerado los valores máximos a los que podrán circular cada conductor (que dependerá del tipo de vehículo que conduzca), y que se muestran en la tabla 3.1. Además, se ha establecido un campo de visión para la toma de decisiones de 100 metros, igual para todos los conductores.

Tipo	Distancia de Seguridad	Distancia de Visión
Cauto	37.5 metros	100 metros
Normal	31.25 metros	100 metros
Arriesgado	25 metros	100 metros
Agresivo	18.75 metros	100 metros
Muy agresivo	12.5 metros	100 metros

Tabla 3.1: Características de los conductores del modelo.

Por último, es necesario definir el tiempo de reacción de cada tipo de conductor, para poder simular el tiempo que tarda un conductor en reaccionar ante un cambio, estableciéndose cuatro tipos de reacciones, independientes del tipo de conductor, que se muestran en la tabla 3.2 y donde se puede observar la proporción de conductores que tienen cada tipo de reacción.

Tipo	Tiempo de Reacción	Proporción
Rápido	1 segundo	7.5%
Normal rápido	2 segundos	25%
Normal	3 segundos	35%
Normal lento	4 segundos	25%
Lento	5 segundos	7.5%

Tabla 3.2: Características de los tiempos de reacción del modelo. Se muestran los tiempos de reacción de cada tipo, y la proporción de conductores que los tienen.

Tipos de Vehículos

Además de los tipos de conductores, es necesario definir los tipos de vehículos que se considerarán en el modelo. En este caso, se han definido cuatro tipos de vehículos, que se describen en la tabla 3.3. Se ha considerado que los vehículos más grandes (camiones y furgonetas) tienen una longitud mayor, y por tanto, una velocidad máxima menor que sedanes y motocicletas. Además, se ha establecido que las motocicletas son más rápidas que los sedanes, principalmente para poder tener distintos tipos de vehículos con distintos patrones de velocidad.

Tipo	Longitud	Velocidad Mínima	Velocidad Máxima	Proporción
Camión	8 metros	55 km/h	80 km/h	10%
Furgoneta	4.5 metros	65 km/h	100 km/h	15%
Sedán	3.5 metros	75 km/h	120 km/h	55%
Motocicleta	2 metros	90 km/h	130 km/h	20%

Tabla 3.3: Características de los vehículos del modelo.

Tipo	Factor	Camión	Furgoneta	Sedán	Motocicleta
Cauto	0.8	64 km/h	80 km/h	96 km/h	104 km/h
Normal	1.0	80 km/h	100 km/h	120 km/h	130 km/h
Arriesgado	1.1	88 km/h	110 km/h	132 km/h	143 km/h
Agresivo	1.2	96 km/h	120 km/h	144 km/h	156 km/h
Muy agresivo	1.3	104 km/h	130 km/h	156 km/h	169 km/h

Tabla 3.4: Características de los conductores del modelo.

Características de la Vía

Para poder simular el comportamiento de los conductores, es necesario definir las características de la vía en la que se desarrollarán las simulaciones.

En este caso, se ha considerado una vía simple, con dos carriles y una única dirección, sin carriles de aceleración o deceleración, en la que se permiten los adelantamientos por el carril izquierdo. La longitud de la vía es de 5000 metros, y se ha establecido una velocidad máxima de 130 km/h, que es la velocidad máxima de los vehículos más rápidos (las motocicletas), que podrá ser rebasada por los conductores más agresivos.

Además, se ha establecido una longitud de sección de 500 metros, que se utilizará para estimar la carga de conductores en diferentes segmentos de la vía y aceptar o rechazar nuevos vehículos, esto es, que si se quieren añadir nuevos vehículos a la vía, se comprobará si la carga de la sección en la que se quiere añadir el vehículo (siempre la primera, al no contar la vía con carriles de aceleración o deceleración) es inferior a un umbral, que se detallará en la sección 3.3. En caso de que la carga sea inferior al umbral, se añadirá el vehículo a la vía, y en caso contrario, se rechazará.

Los vehículos y tiempos de reacción de estos son escogidos de forma aleatoria siguiendo los pesos probabilísticos establecidos en la columna de proporción de las tablas 3.3 y 3.2 respectivamente, y para cada tipo de conductor se escogerán distintas combinaciones para analizar el comportamiento de los conductores en diferentes situaciones, detallado en la sección 3.3. La velocidad de los vehículos se establece en función del tipo de vehículo y del tipo de conductor uniformemente según la tabla 3.4.

Por último, se ha considerado que la vía no presenta condiciones adversas, como el clima o el estado de la carretera, que podrían influir en el comportamiento de los conductores, pero que queda fuera del alcance de este modelo.

Otros Parámetros

Además de los parámetros mencionados anteriormente, es necesario definir otros parámetros que permitan simular el comportamiento de los conductores en situaciones de tráfico adversas, como accidentes o atascos.

En este caso, se ha considerado que los accidentes se producen cuando un vehículo colisiona con otro, es decir, cuando las posiciones de los vehículos quedan superpuestas en función de la longitud de cada uno y el punto que ocupan en el espacio de una dimensión sobre la que avanzan (considerado el punto central del vehículo). En caso de que se produzca un accidente, se detendrán los vehículos implicados en el mismo, y se establecerá un tiempo de espera de $15s$ por cada vehículo implicado en el accidente hasta que se limpie la vía, momento en el que los vehículos implicados dejarán de formar parte de la simulación. Se calcula el tiempo de limpieza de un accidente según la ecuación 3.1, donde N_{vehicles} es el número de vehículos implicados en el accidente.

$$t_{\text{expiration}} = 15s \cdot N_{\text{vehicles}} \quad (3.1)$$

En ningún caso los conductores implicados reanudarán la marcha, y su velocidad se establecerá a 0 km/h hasta que se limpie la vía. De esta forma, naturalmente surgirán atascos (además de por otras variantes como la propia saturación de la vía en condiciones de alta densidad de tráfico), que se podrán analizar en las simulaciones. En las simulaciones, el umbral de accidentes se establecerá en 0.1, es decir, si en algún momento la simulación supera el 10% de accidentes, se detendrá y no se considerará válida para el análisis de tiempos, aunque sí se tendrá en cuenta para el análisis de accidentes.

3.2 Herramientas y Tecnologías

Lenguaje de Programación

Se optó por utilizar *Python* como lenguaje principal para desarrollar el modelo de simulación. La elección de *Python* se basa en su versatilidad y facilidad de programación, lo que permitió una rápida iteración y prueba de ideas. Si bien no es el lenguaje más eficiente en términos de tiempo de ejecución, la eficiencia de desarrollo compensó esta limitación.

Bibliotecas Principales

Para llevar a cabo las simulaciones y análisis, se emplearon las siguientes bibliotecas:

- *Numpy*: Utilizada para operaciones matemáticas y manipulación de datos.
- *Scipy*: Proporciona herramientas y algoritmos matemáticos para operar con *Python*.
- *TensorFlow Probability*: Usada para operaciones estadísticas y probabilísticas avanzadas.
- *Matplotlib*: Empleada para visualizar resultados y generar gráficos pertinentes.
- *Logging*: Esta biblioteca fue esencial durante la fase de desarrollo, permitiendo un registro detallado y seguimiento de los eventos durante las simulaciones, facilitando la identificación y corrección de errores.
- *Pandas*: Utilizada para el análisis de datos y la generación de estadísticas.

Control de Versiones

Se empleó *Git* como herramienta de control de versiones, garantizando la trazabilidad y el registro de cambios en el código. Esta herramienta resultó crucial para poder retornar a versiones estables del código ante posibles fallos o problemas, asegurando así la integridad y continuidad del proyecto.

Hardware y Plataforma de Simulación

Las simulaciones se llevaron a cabo en un servidor dedicado con las siguientes especificaciones:

- **RAM:** 32 GB a 2400MHz.
- **CPU:** AMD Ryzen 7 3800X 8-core a 3.9 GHz.
- **Disco Primario:** SSD M.2 1TB con velocidades de 1800MB/s tanto en lectura como en escritura.

Aunque se consideró la opción de usar *Google Colab* para realizar las simulaciones, se descartó debido a las restricciones de tiempo de ejecución. La versión gratuita de *Colab* limita las sesiones a 12 horas, y aunque la versión *Pro* extiende este límite a 24 horas, ejecutar las simulaciones en un servidor propio ofreció una mayor flexibilidad y control, permitiendo además ejecutar múltiples simulaciones en paralelo.

3.3 Diseño Experimental

Definición del Experimento

El propósito central de este experimento es analizar la influencia de la agresividad en la conducción sobre el tiempo global medio de viaje. Específicamente, se busca comprobar si un aumento en la proporción de conductores agresivos disminuye o aumenta este tiempo.

Asimismo, se pretende explorar si estos conductores se benefician únicamente cuando hay una mayor presencia de conductores cautos. Aunque se espera que los conductores agresivos tengan tiempos de viaje global más cortos, se postula que este tipo de estrategia más agresiva seguida por estos conductores podría tener un efecto negativo no tanto en el tiempo de viaje, que debería ser menor, sino en cuántos conductores logran completar el viaje durante el tiempo de simulación en comparación con otros conductores que siguen estrategias más cautelosas.

Es decir, se espera que los atascos producidos tanto por los accidentes como por la congestión del tráfico sean más frecuentes en las simulaciones con una mayor proporción de conductores agresivos.

Parámetros Fijos

- Vía: longitud de 5000 metros, sección de 500 metros, 2 carriles.
- Instantes de Simulación: 1000.

- Proporción de tiempos de reacción, tipos de coche, distancias de seguridad: descrito detalladamente en la sección del modelo de simulación.
- Presencia de conductores por carril (al ser introducidos a la vía): 15% izquierdo, 85% derecho.

Parámetros Variables

- Número de conductores en la primera sección: se incrementará de 10 en 10, desde 10 hasta 100.
- Proporción de tipos de conductores: Se probarán distintas combinaciones y gradientes, detallado en la tabla 3.5.

Configuraciones de las Simulaciones

Se realizarán 18 simulaciones, con distintas configuraciones de tipos de conductores, que se muestran en la tabla 3.5.

Simulación	Cautos	Normal	Arriesgado	Agresivo	Temerario
1	100%	0%	0%	0%	0%
2	0%	100%	0%	0%	0%
3	0%	0%	100%	0%	0%
4	0%	0%	0%	100%	0%
5	0%	0%	0%	0%	100%
6	50%	0%	0%	0%	50%
7	0%	50%	0%	50%	0%
8	90%	0%	0%	0%	10%
9	0%	90%	0%	10%	0%
10	50%	50%	0%	0%	0%
11	0%	0%	50%	50%	0%
12	20%	20%	20%	20%	20%
13	40%	30%	15%	10%	5%
14	5%	10%	15%	30%	40%
15	25%	25%	25%	25%	0%
16	0%	25%	25%	25%	25%
17	0%	33%	34%	33%	0%
18	5%	15%	60%	15%	5%

Tabla 3.5: Composición de las estrategias de simulación.

Métricas de Evaluación

- Tiempo total de viaje: evaluará la mediana del tiempo total que toma a todos los vehículos recorrer la distancia completa.
- Número de accidentes: registra la mediana del total de accidentes ocurridos durante la simulación.
- Número de vehículos que completaron el viaje: evaluará la mediana del número de vehículos que lograron

completar el viaje.

Procedimiento

Inicialización

Estado inicial de la carretera: vacía.

El tiempo evolucionará de forma discreta. Es decir, en el modelo las variables cambiarán en instantes específicos y separados, en lugar de cambiar continuamente: en lugar de tener un flujo constante de tiempo, el tiempo se divide en unidades o pasos separados.

En el contexto de simulaciones, trabajar con tiempo discreto permite analizar el comportamiento del sistema en momentos determinados, facilitando el procesamiento y la comprensión de los eventos. Cada instante se corresponderá con un segundo de tiempo real.

En cada segundo (cada instante en las simulaciones), se evalúa si el número de conductores en la primera sección es inferior al límite máximo establecido para el caso en consideración. Si la condición se cumple, se introduce un nuevo conductor a la vía.

Ejecución

Dado que el tiempo es discreto, en cada iteración se considera un *instante congelado* del tiempo. La *velocidad de reacción* del conductor determina qué instante discreto (en segundos) del pasado de la simulación se escogerá para tomar decisiones (1-5 instantes anteriores, como se explicó en la sección 3.1). Para actualizar la posición y velocidad de cada conductor, se invoca al algoritmo 3.1.

Métodos de Actualización

Las decisiones específicas sobre la actualización de la velocidad y el carril se basan en los algoritmos 3.1, 3.2 y 3.3. Para una visión más detallada del código y la implementación completa, se puede acceder al repositorio del proyecto en GitHub¹.

- Si no hay conductor delante, el conductor intentará alcanzar su velocidad máxima.
- Si hay un conductor delante:
 - Evalúa si puede adelantar, es decir, si su velocidad es mayor y el carril contiguo está libre.
 - Si no puede adelantar, ajusta su velocidad para mantener una distancia segura con el conductor de delante.
- Determina si el conductor puede o debe cambiar de carril basándose en condiciones como la presencia de otro conductor delante, la existencia de espacio libre en el carril contiguo, el espacio libre en el carril actual y el tiempo que lleva en el carril actual (hay un mínimo de 8-12 segundos elegidos uniformemente antes de que el conductor pueda cambiar de carril para evitar cambios de carril constantes).
- Si no hay necesidad o no es posible cambiar de carril, el conductor permanecerá en su carril actual.

¹ Enlace del repositorio: <https://github.com/alvarorp00/traffic-models>

```

Entrada: driver, conductor actual
Entrada: state, estado del modelo de tráfico
Salida : driver, conductor actualizado

1   dfront  $\leftarrow$  driver_at_front(state);
2   dback  $\leftarrow$  driver_at_back(state);
3   lane  $\leftarrow$  lane_update(driver, state);
4   if lane  $\neq$  driver.lane then
5     dfront  $\leftarrow$  driver_at_front(state);
6     dback  $\leftarrow$  driver_at_back(state);
7   end
8   speed  $\leftarrow$  speed_update(driver, dfront, dback);
9   driver.speed  $\leftarrow$  speed;
10  return driver;

```

Algoritmo 3.1: Método para actualizar la velocidad y el carril del conductor.

```

Entrada: driver, conductor actual
Entrada: dfront, conductor al frente
Entrada: dback, conductor atrás
Salida : speed, Velocidad actualizada
1   if  $\exists dfront$  then
2     safe_distance  $\leftarrow$  calculate_safe_distance(driver);
3     distance_to_front  $\leftarrow$  calculate_distance_to_front(driver, dfront);
4     desired_speed  $\leftarrow$  calculate_desired_speed(driver, safe_distance, distance_to_front);
5   else
6     desired_speed  $\leftarrow$  get_max_speed(driver);
7   end
8   return min(desired_speed, get_max_speed_by_type(driver));

```

Algoritmo 3.2: Método para actualizar la velocidad del conductor.

Finalización y Recopilación de Datos

Al concluir cada simulación, se procede a una fase de recopilación y almacenamiento de datos críticos para el análisis posterior. Los pasos que se llevan a cabo se detallan a continuación.

Finalización de la Simulación

Una vez que se alcanza el término de la simulación, ya sea por tiempo o por cumplimiento de alguna condición preestablecida, se detiene la ejecución y se pasa al proceso de consolidación de los datos obtenidos.

Procesamiento de los Resultados

Antes de guardar los datos, se realizan cálculos intermedios para obtener métricas relevantes. En este caso, dada la naturaleza de los datos y para reducir el impacto de valores atípicos o extremos, se

```

Entrada: driver, conductor actual
Entrada: state, estado de la simulación
Salida : lane, carril actualizado

1   current_lane ← driver.get_current_lane();
2   if can_overtake(driver, state) then
3       next_lane ← next_lane(current_lane);
4       can_switch_lane ← can_switch_to_lane(driver, state, next_lane);
5       if can_switch_lane and driver.time_in_lane == 0 then
6           driver.time_in_lane ← calculate_time_in_lane(driver);
7           lane ← next_lane;
8       else
9           lane ← current_lane;
10      end
11      else if can_return_lane(driver, state, current_lane) then
12          lane ← prev_lane(current_lane);
13      else
14          lane ← current_lane;
15      end
16      return lane;

```

Algoritmo 3.3: Método para actualizar el carril del conductor.

decide usar la mediana. Por lo tanto, se calculan las medianas de:

- Tiempo que tardan los conductores en completar el trayecto.
- Accidentes ocurridos durante la simulación.
- Número de conductores que han logrado finalizar el recorrido.

Adicionalmente, estos cálculos se segmentan y se realizan por cada tipo de conductor, permitiendo un análisis más detallado y categorizado.

Almacenamiento de Datos

Los resultados de cada simulación se almacenan en un fichero CSV, permitiendo preservar y analizar posteriormente los datos obtenidos. Además, se generan gráficas para visualizar los resultados de forma más intuitiva.

3.4 Consideraciones

Limitaciones del Estudio y Validez de los Modelos

El estudio no puede capturar cómo afectarían cambios en la climatología o estado de la carretera, ya que es un modelo muy simple que sirve principalmente como base para seguir desarrollando sobre él. Por ejemplo, podrían considerarse carriles de aceleración y deceleración, así como alternar el número de carriles durante el transcurso del viaje (aumentar a 3 y luego reducir a 2 otra vez, por ejemplo, para

simular un carril de aceleración o deceleración).

Además, al dividir a los conductores en 5 tipos, se pierde la capacidad de modelar conductores con características intermedias entre dos tipos, ya que se ha optado por una clasificación simple. Por ejemplo, un conductor que sea más agresivo que un conductor cauto, pero menos que un conductor normal, no podría ser modelado, lo que hace que el modelo sea menos realista. Además, no siempre todos los conductores se comportan de la misma manera, por lo que se pierde la capacidad de modelar conductores que se comporten de forma distinta en diferentes situaciones.

Precauciones

El estudio bajo este modelo se considera simple, y pretende analizar a grandes rasgos la evolución de un sistema. Para asemejarse más a la realidad, se deberían detallar más parámetros que no se han tenido en cuenta.

Escalabilidad

Al estar la vía dividida en secciones, podría ser viable alterar cada una independientemente, incluyendo otros carriles en una de ellas, por ejemplo. Lo que sería más difícil de plantear es incluir climatología o estado de la carretera, ya que implicaría hacer cambios profundos en las funciones de actualización de estado de los conductores.

Decisiones de Diseño

Se optó por utilizar un espacio continuo para facilitar la actualización de la posición y tiempo discreto para relajar la complejidad al actualizar cada iteración.

RESULTADOS

Tras llevar a cabo el proceso de simulación descrito en la metodología, se han obtenido una serie de datos que arrojan algo de luz sobre el comportamiento y evolución de los conductores en diferentes escenarios de tráfico. Recuérdese que se han realizado 18 simulaciones, cada una con sus propias condiciones y parámetros, permitiendo explorar una variedad de situaciones y obtener una visión completa del sistema.

Una de las primeras impresiones se obtiene al analizar en la figura 4.1 la evolución del porcentaje de simulaciones que lograron terminar sobre el total de simulaciones ejecutadas que se detallaron en la tabla 3.5. (200 veces se repitió la simulación para cada configuración de tráfico). Esta gráfica brinda una idea de cómo se comporta el sistema y cómo la densidad de tráfico y la saturación pueden influir en la viabilidad de las simulaciones. En la figura se puede observar que, en general, las simulaciones con la densidad de tráfico más baja (10 vehículos en 500 metros) obtienen un porcentaje de éxito que, salvo en los casos de conductores cautos y normales, decrece rápidamente. También se puede observar la pequeña tasa de éxito de las simulaciones donde el grupo predominante son los conductores más agresivos, lo que sugiere que este tipo de conductores pueden ser más propensos a provocar accidentes o situaciones de riesgo.

A continuación, se desglosarán los resultados obtenidos para cada métrica, ofreciendo un análisis y comparativas para los escenarios simulados. Cabe destacar que, debido a la gran cantidad de datos obtenidos, se ha optado por mostrar los resultados más relevantes y significativos con el fin de facilitar la interpretación de los mismos.

4.1 Resultados de las Simulaciones

Las gráficas presentadas aquí representan las medianas obtenidas para cada configuración de densidad de conductores y nivel de saturación, todas ellas superpuestas de forma global. En concreto, veremos globalmente los resultados obtenidos para las métricas mencionadas en la sección 3.3, y posteriormente se analizarán con más detalle los resultados de cada métrica.

En las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se pueden observar superpuestas las medianas de las métricas de las

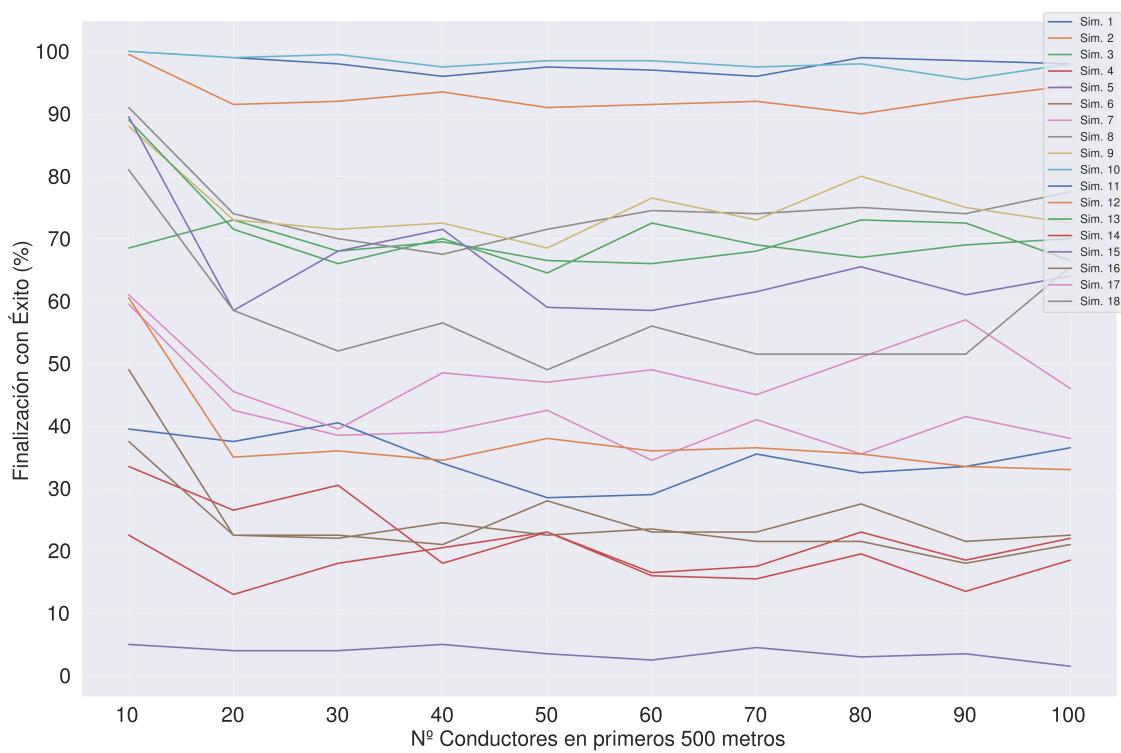


Figura 4.1: Porcentaje de simulaciones exitosas, i.e. que lograron terminar con un ratio de accidentes < 10% en las distintas configuraciones de saturación, en función de la densidad de tráfico introducida. Cada punto representa la mediana de los resultados obtenidos de las 200 simulaciones realizadas para cada configuración, y cada línea cada una de las distintas simulaciones realizadas.

simulaciones para cada configuración, divididas por tipo de conductor.

Accidentes

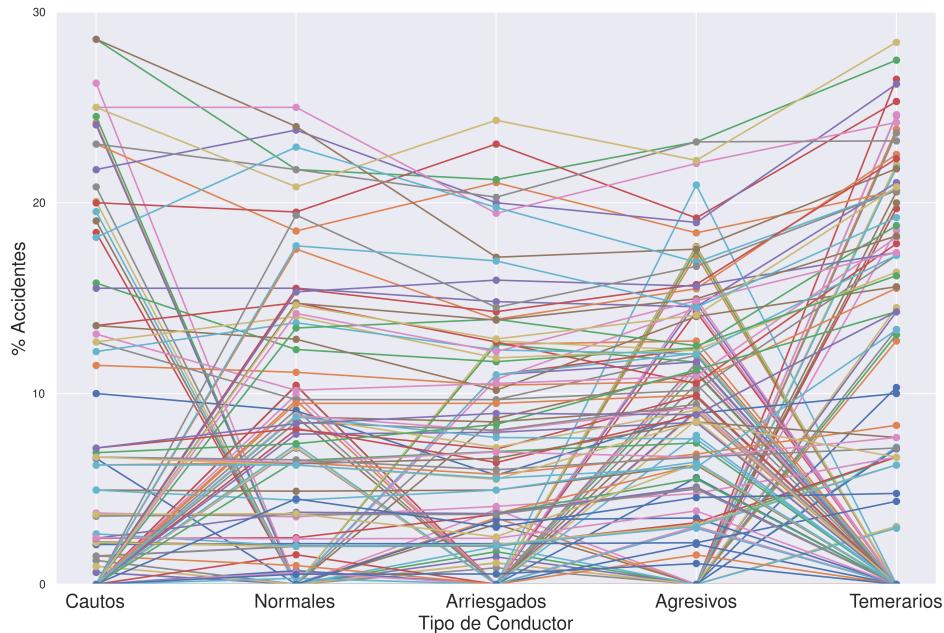


Figura 4.2: Gráfico que representa el porcentaje de accidentes en relación con el total de conductores para cada categoría de comportamiento al conducir. Cada punto en la gráfica corresponde al porcentaje que representan los conductores accidentados sobre el total de conductores que terminaron la simulación (un conductor termina cuando finaliza el recorrido o se accidenta). Las categorías de conductores van desde Cautos a Temerarios. Un valor de 0% indica que no hubo accidentes o no había conductores de ese tipo en las simulaciones. La gráfica ofrece una visión comparativa de cómo la propensión a los accidentes varía según el comportamiento de conducción.

En la figura 4.2 se puede observar el porcentaje que representan los accidentes para cada grupo de conductores sobre el total de conductores que han terminado la simulación. Recuérdese que *terminar* la simulación significa que el conductor o bien ha llegado a su destino, o bien ha sido eliminado por tener un accidente. Para esta estadística no se tiene en cuenta el número de conductores que se encuentren activos, puesto que no se puede saber a priori cuántos de ellos completarán o se accidentarán durante la simulación.

En esta figura ha de observarse lo primero cuánto de dispersos o juntos están los resultados de cada grupo de conductores. En este caso aparece un caso curioso con los conductores cautos, y es que vemos que hay un alto grado de dispersión en los resultados. Esto a priori no tiene mucho sentido ya que, como se ha comentado, los conductores cautos deberían ser los que menos accidentes provocan. Sin embargo, esto puede deberse a que en las simulaciones con conductores cautos haya

habido presencia de conductores que toman más riesgos, y por tanto ha habido más influencia en los resultados (por ejemplo, en las simulaciones combinadas con los conductores temerarios). Veremos esto en detalle en la sección 4.2.

También existe dispersión en los resultados de los conductores normales, aunque mucho menos pronunciada. Esto puede deberse a que en las simulaciones con conductores normales, la presencia de los conductores que toman estos riesgos ha sido menor, y por tanto no ha habido tanta influencia en los resultados. En realidad, podemos ver que estos conductores se combinan con los agresivos, un nivel de riesgo por debajo respecto a los temerarios, y por tanto es de esperar que haya menos accidentes.

Para los conductores agresivos y temerarios se observa una gran dispersión en los resultados, siendo estos grupos los que más accidentes han provocado. Es interesante ver esta dispersion de los datos, ya que en algunos casos se observa una gran variabilidad en los resultados, mientras que en otros casos los resultados son más homogéneos.

Conductores que finalizaron la simulación

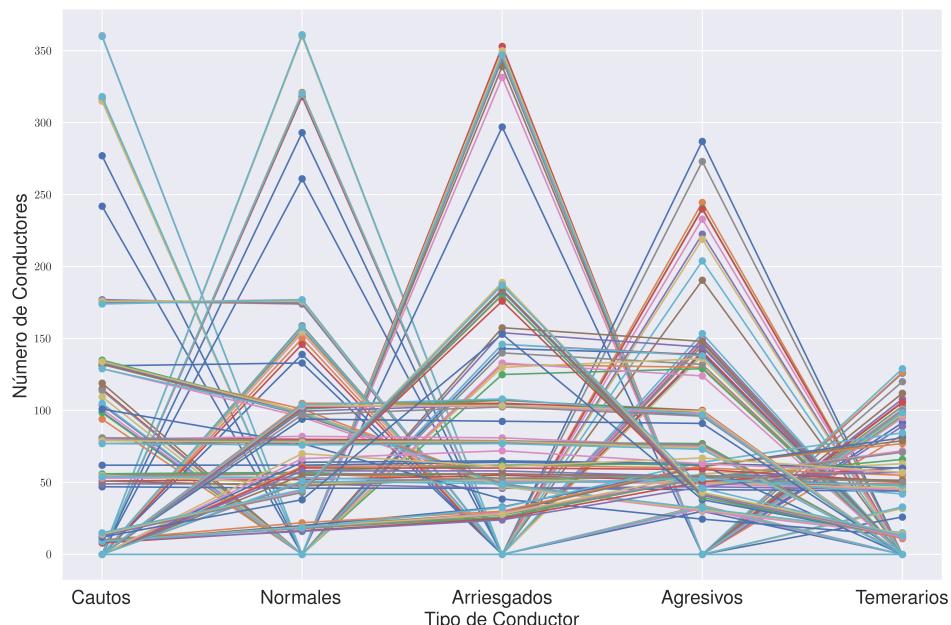


Figura 4.3: Gráfico que ilustra la cantidad de conductores que completaron exitosamente la simulación según su categoría de comportamiento al conducir. Cada punto refleja la mediana del número de conductores de las simulaciones para esa categoría específica. Las categorías abarcan desde Cautos a Temerarios. El gráfico proporciona una perspectiva sobre la distribución de conductores según su comportamiento en las simulaciones realizadas.

La figura 4.3 por sí sola no aporta mucha información ya que dependerá de cuántas simulaciones

tengan a cada grupo en concreto, pudiendo haber más de un tipo simplemente por cómo se han establecido en la tabla 3.5, pero es interesante ver cómo la relación entre esta figura y la figura 4.2 es inversa. Esto es, a mayor número de accidentes, menor número de conductores que completaron la simulación. Esto tiene sentido, ya que los conductores que provocan accidentes, primero son eliminados de la simulación, y segundo, provocan que otros conductores no solo sean eliminados sino que también se vean afectados por la congestión que provocan los accidentes.

Otro hecho interesante es, tal y cómo se han planteado las simulaciones, y como se ha comentado ya, los conductores cautos son los que a priori deberían tener un menor número de conductores accidentados que completaron la simulación. Sin embargo, el número de accidentes asociado a este tipo es más alto que el de los normales y arriesgados, y por tanto el número de conductores que completaron la simulación es menor (obsérvese cómo el pico es menos denso).

Tiempos

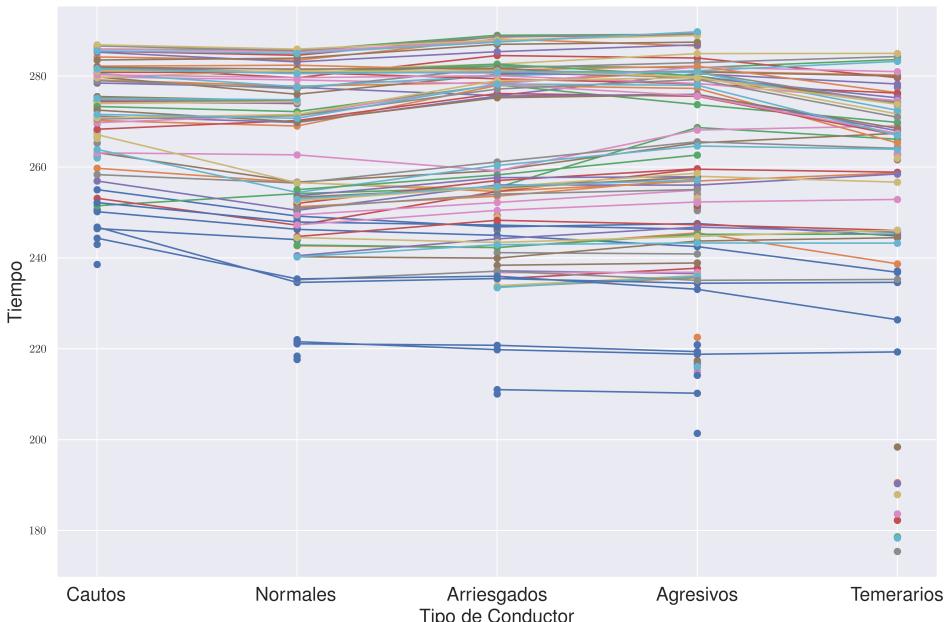


Figura 4.4: Gráfico que muestra la mediana de tiempos de conducción para cada categoría de comportamiento al conducir y para cada simulación. Cada punto en la gráfica representa la mediana del tiempo promedio obtenida de las simulaciones para esa categoría. Las categorías varían desde Cautos hasta Temerarios. Esta representación ayuda a entender cómo el comportamiento al conducir puede influir en la duración del tiempo de conducción.

En la figura 4.4 se muestra la mediana de los tiempos de finalización de las simulaciones en función de la configuración. Un pequeño detalle a comentar es que, dado que en algunas simulaciones la presencia de algunos tipos de conductores es nula, el dato no aparece representado en la gráfica,

apareciendo por ello algunos puntos aislados. Esto no afecta a la interpretación, y permite visualizar con mayor claridad los resultados que si se incorporaran todos los puntos para incluir el 0.

Si nos fijamos en el grueso de los resultados, vemos cómo los conductores cautos son los que menos dispersión presentan, y los que más tardan en completar el recorrido. A medida que los conductores son más arriesgados, la dispersión aumenta, y los tiempos en los valores más bajos tienen una tendencia claramente descendente. Se puede observar claramente una diferencia de ≈ 75 segundos entre el caso más rápido de un conductor cauto y el caso más rápido de un conductor temerario.

Sin embargo, tomar estos valores sin tener en cuenta las otras gráficas es un error, ya que podría llevar a pensar que los conductores más agresivos son los que más rápido completan el recorrido, cuando en realidad, como se ha visto en la figura 4.2, son los que más accidentes y congestión provocan.

4.2 Análisis de los Resultados

Puesto que como se ha mencionado al principio de esta sección, el número de datos y gráficas obtenidas es elevado, se ha optado por mostrar los resultados más relevantes y significativos. Esto implica que de cara a mostrar los resultados en la carretera poco saturada y muy saturada, se utilizarán los casos más extremos disponibles (10 conductores cada 500m; 100 conductores cada 500m). En esta sección, el número de conductores accidentados se indica de forma absoluta, es decir, el número de conductores accidentados, y no como una proporción del total de conductores.

Como se ha mencionado anteriormente, en la figura 4.2 se puede observar un pico en el número de accidentes para los conductores cautos, y en cambio en la figura 4.5 se puede observar que los conductores cautos no han provocado ningún accidente.

Esto parece que confirma la hipótesis de que los conductores cautos no provocan accidentes, y que por tanto el pico observado en la figura 4.2 se ha de deber a la influencia de los conductores agresivos.

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran que una alta proporción de conductores temerarios puede causar accidentes entre los conductores cautos. No obstante, si solo hay un 10% de temerarios, los accidentes son mínimos, incluso en alta saturación.

Sorprendentemente, la presencia de estos conductores temerarios no mejora significativamente el tiempo promedio ni la cantidad de conductores que completan el trayecto, comparado con un sistema de solo conductores cautos. De hecho, en alta saturación, se reduce la eficiencia debido a accidentes. Por ello, se deduce que tener conductores agresivos en un sistema dominado por cautos no es beneficioso: en una distribución 90 – 10 las diferencias son mínimas, pero en 50 – 50 los accidentes aumentan considerablemente.

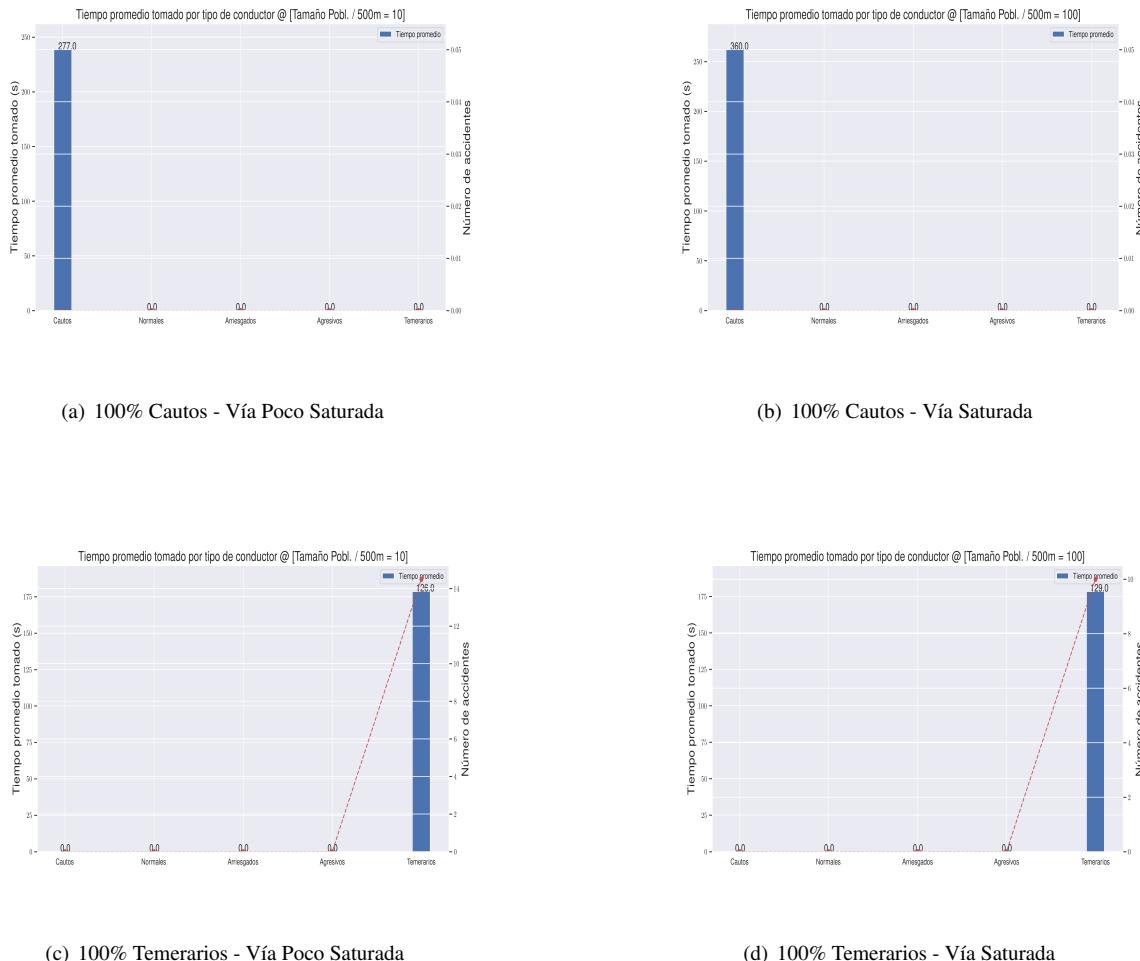


Figura 4.5: Comparación de los resultados de las simulaciones para conductores 100% Cautos y 100% Temerarios en distintas condiciones de saturación de vía. La simulación muestra que los conductores cautos no han provocado ningún accidente. En cambio, los conductores temerarios sí, y además un menor número de conductores temerarios ha logrado completar la simulación en comparación a los cautos, si bien en un menor tiempo. La barra indica la mediana del tiempo que cada conductor toma para completar el recorrido. El número encima de la barra es la mediana del número de conductores de ese tipo que han completado la simulación. La línea roja indica la mediana del número de conductores de ese tipo envueltos en accidentes.

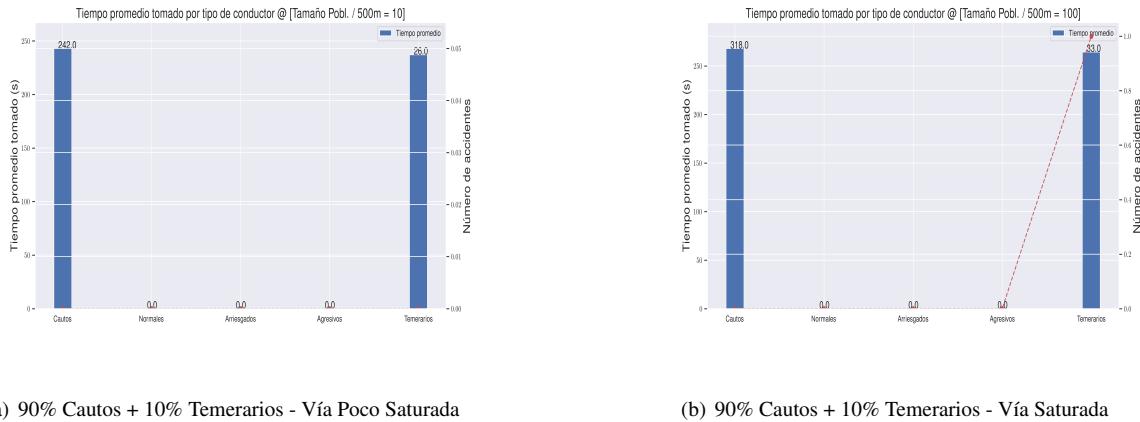


Figura 4.6: Resultados de simulación con 90% cautos y 10% temerarios en condiciones de poca y mucha saturación.

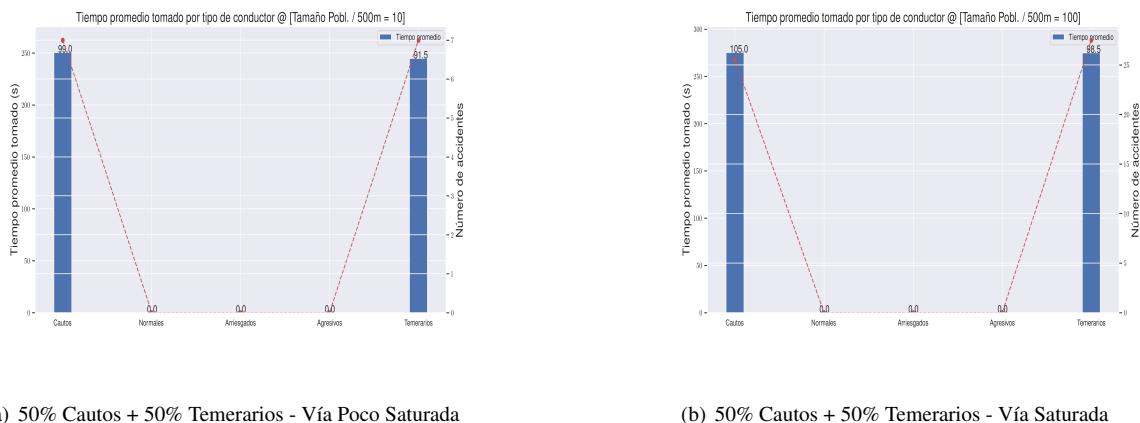


Figura 4.7: Resultados de simulación con 50% cautos y 50% temerarios en condiciones de poca y mucha saturación.

Si contrastamos ahora los resultados de la mediana del tiempo que tarda cada conductor cauto en completar el trayecto junto con la mediana del número de accidentes, podemos observar que en la figura 4.8 se observan las tres líneas correspondientes a las simulaciones con 100% conductores cautos, 90% conductores cautos y 50% conductores cautos, mostradas en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 respectivamente. Es interesante ver que, efectivamente, la presencia de conductores temerarios perjudica en todos los casos el tiempo promedio de travesía (en las figuras anteriores mencionadas solo se mostraban los niveles de saturación más extremos), y que además, a mayor presencia de conductores temerarios y mayor saturación, mayor es el número de accidentes.

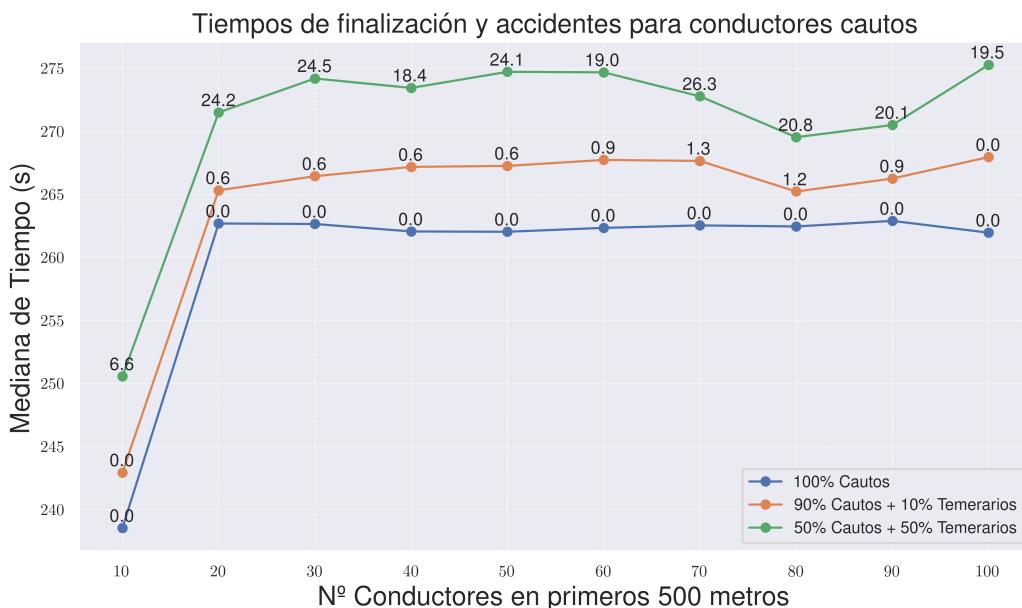


Figura 4.8: Gráfico que muestra la mediana de tiempos de conducción y la mediana de accidentes para conductores cautos en diferentes configuraciones con conductores temerarios y niveles de saturación. Cada línea en la gráfica representa la mediana del tiempo promedio obtenida de las simulaciones para una configuración específica, y cada punto en esa línea representa un nivel diferente de saturación de la vía. Encima de cada punto, se muestra el número de accidentes de los conductores cautos para ese nivel y configuración.

Las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 muestran que los conductores normales reaccionan de forma similar a los cautos ante la presencia de conductores agresivos. Es decir, introducir un pequeño o moderado número de conductores agresivos no mejora los resultados comparados con un sistema de solo conductores normales.

De nuevo, volvemos a hacer una comparación de los resultados de la mediana del tiempo que tarda cada conductor normal en completar el trayecto junto con la mediana del número de accidentes. Podemos observar los resultados en la figura 4.12, en que se observan las tres líneas correspondientes a las simulaciones con 100% conductores normales, 90% conductores normales y 50% conductores normales, mostradas en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 respectivamente. En este caso existe una diferencia más notable entre los resultados de las simulaciones si se compara con el caso de los conductores

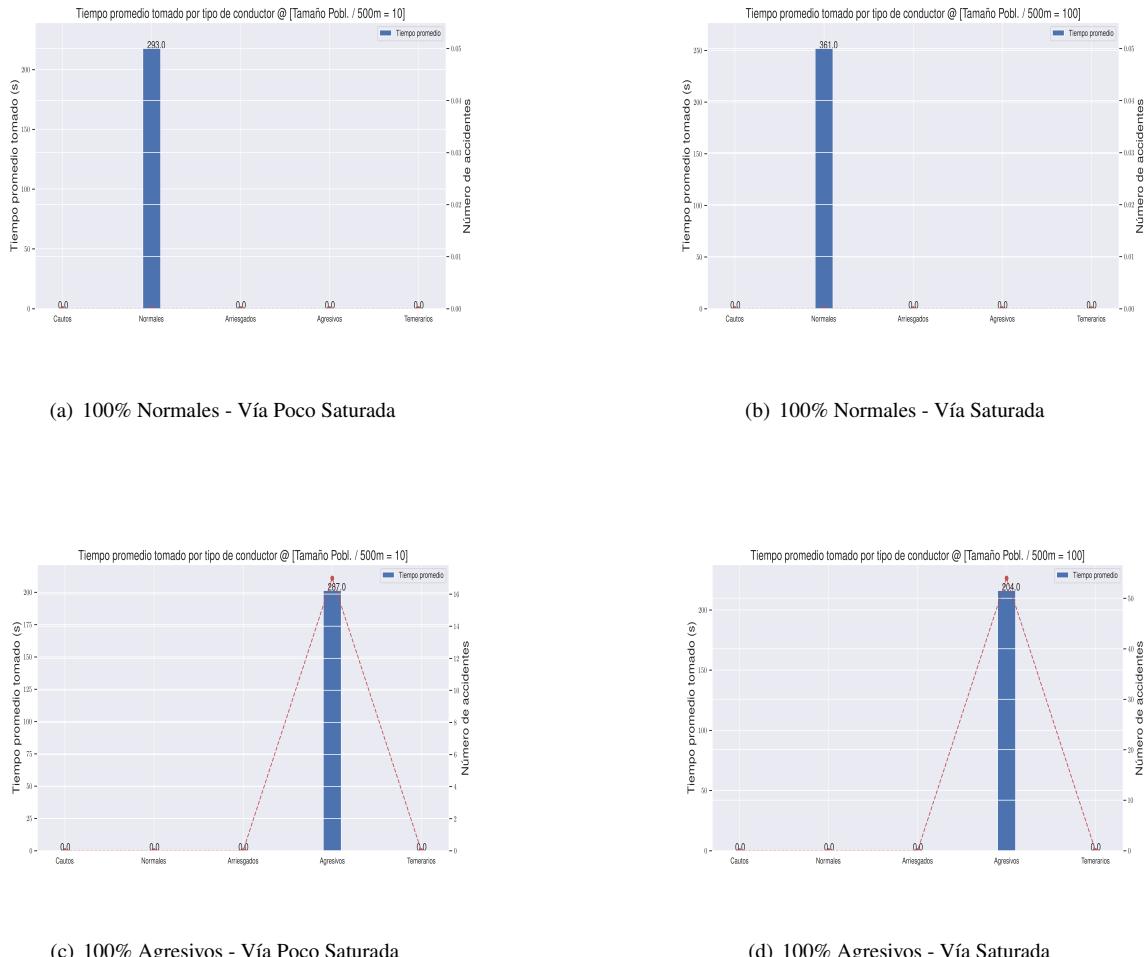


Figura 4.9: Comparación de los resultados de las simulaciones para conductores 100% Normales y 100% Agresivos en distintas condiciones de saturación de vía. La simulación muestra que los conductores normales no han provocado ningún accidente. En cambio, los conductores agresivos sí, y además un menor número de conductores agresivos ha logrado completar la simulación en comparación a los normales, si bien en un menor tiempo.

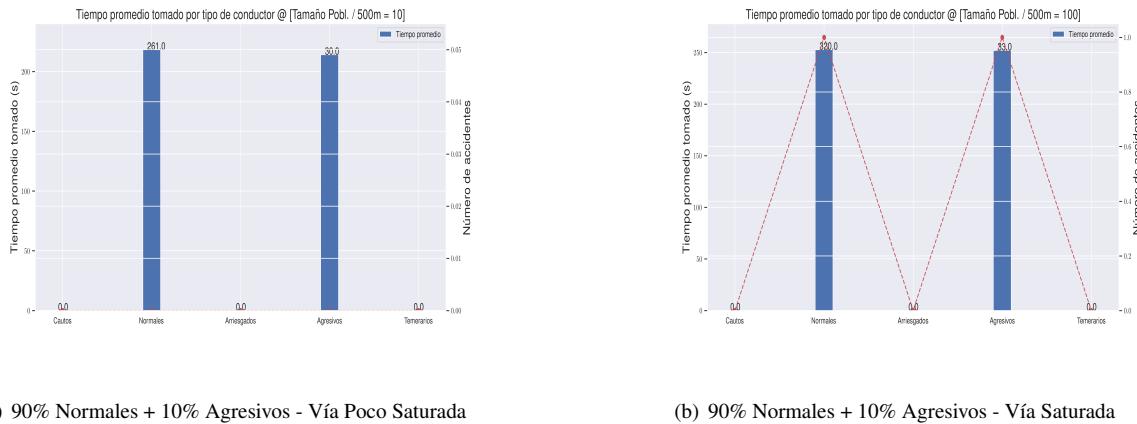


Figura 4.10: Resultados de simulación con 90% normales y 10% agresivos en condiciones de poca y mucha saturación.

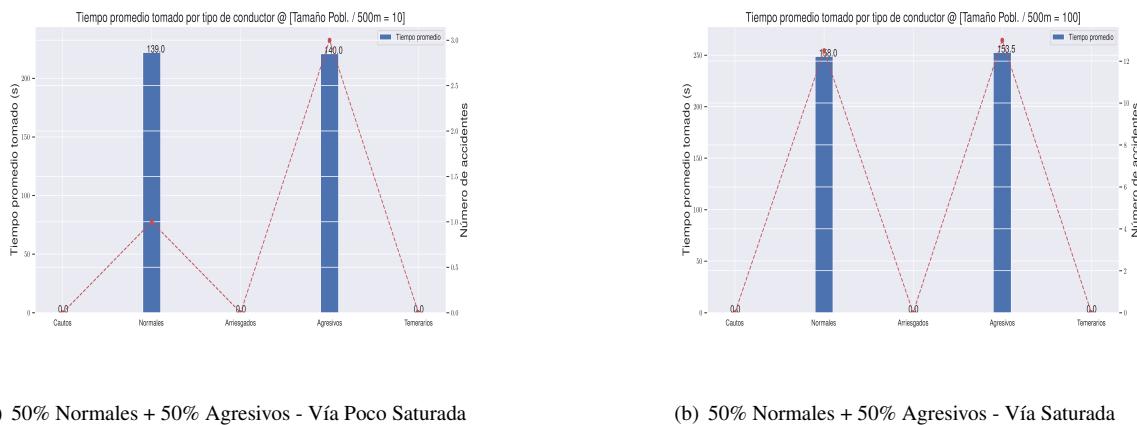


Figura 4.11: Resultados de simulación con 50% normales y 50% agresivos en condiciones de poca y mucha saturación.

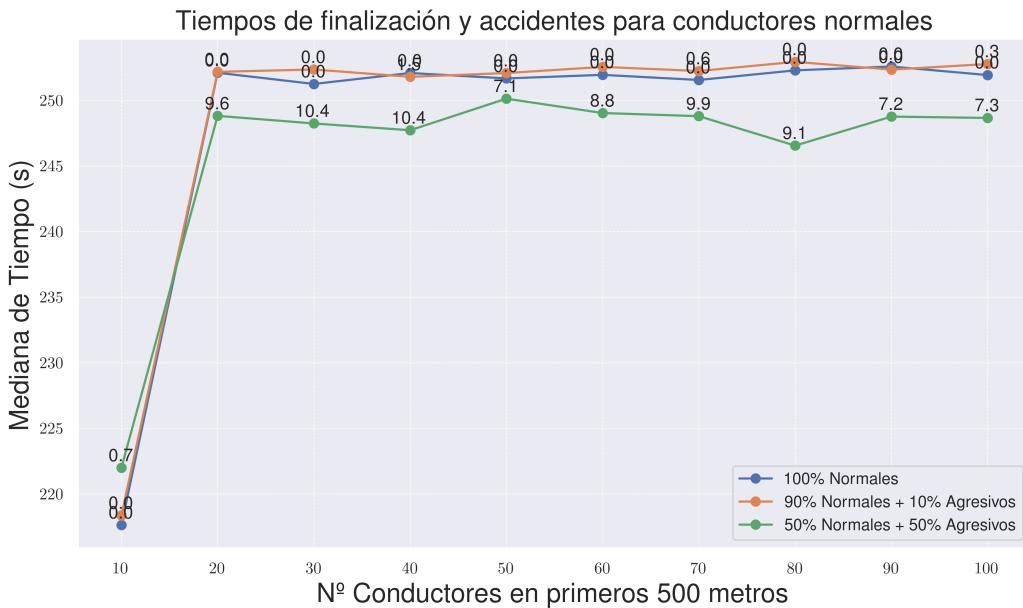


Figura 4.12: Gráfico que muestra la mediana de tiempos de conducción y de accidentes para conductores normales en diferentes configuraciones con conductores agresivos y niveles de saturación. Cada línea en la gráfica representa la mediana del tiempo promedio obtenida de las simulaciones para una configuración específica, y cada punto en esa línea representa un nivel diferente de saturación de la vía. Encima de cada punto, se muestra el número de accidentes de los conductores normales para ese nivel y configuración.

cautos. Una presencia del 10% de conductores agresivos genera un muy ligero crecimiento de los accidentes y apenas afecta al tiempo promedio de travesía para este tipo de conductores. Sin embargo, si la presencia de conductores agresivos aumenta hasta el 50%, el número de accidentes crece, aunque el tiempo total de travesía se reduce ligeramente.

En las figuras 4.13 y 4.14, notamos que los conductores arriesgados raramente causan accidentes por sí solos, excepto en situaciones de alta saturación. Pero al mezclarse con conductores agresivos, los accidentes aumentan considerablemente y menos conductores logran completar la simulación. A pesar de esto, el tiempo promedio no se altera significativamente. Este patrón es similar al observado cuando conductores cautos y normales interactúan con aquellos más agresivos.

Este análisis muestra una simulación con una mezcla variada de tipos de conductores (figura 4.15). En este caso predominan los conductores arriesgados pero mantienen una presencia notable tanto conductores normales como agresivos y, en menor medida, cautos y temerarios.

La combinación de todos estos estilos de conducción presenta resultados interesantes. Con poca saturación no hay una mejora significativa en el tiempo promedio de travesía comparado con otros grupos menos variados, y la tasa de accidentes sigue siendo notable.

En condiciones de vía saturada el número de accidentes es elevado y el tiempo de travesía se

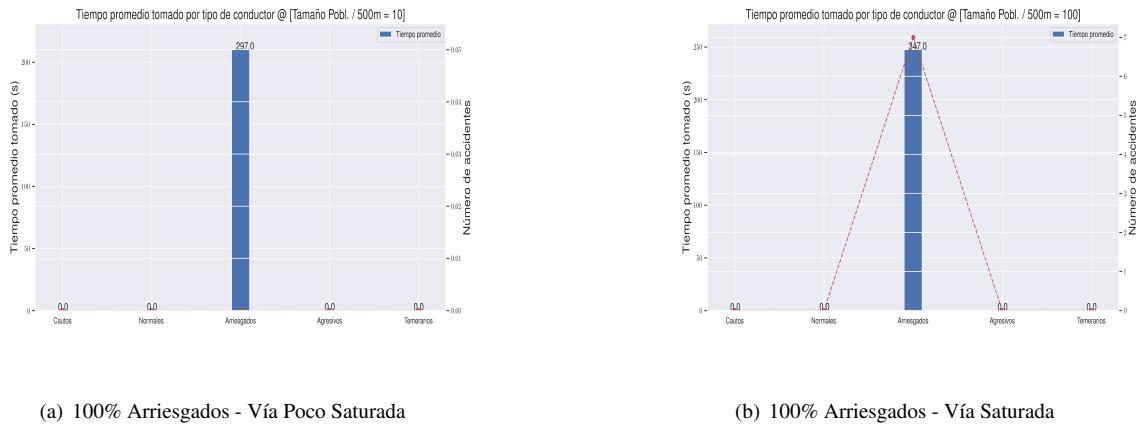


Figura 4.13: Resultados de simulación con 100% conductores arriesgados en condiciones de poca y mucha saturación.

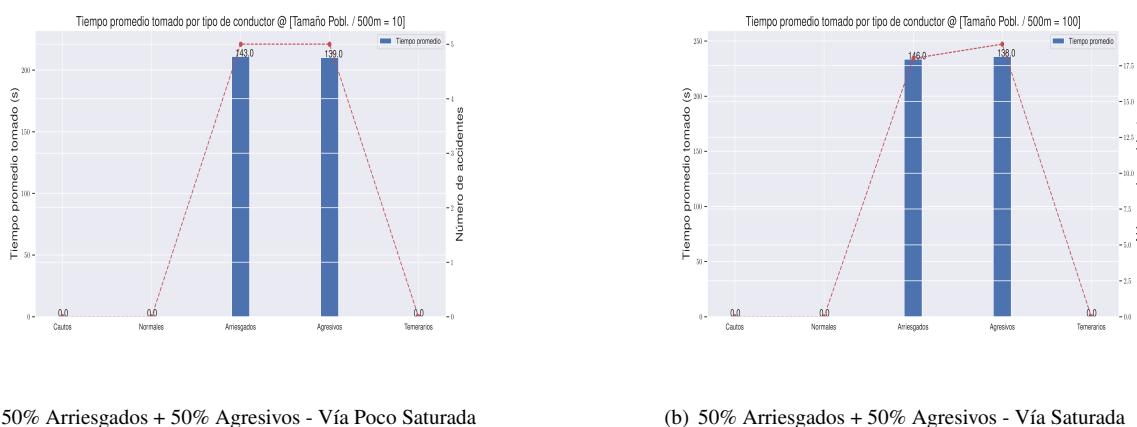
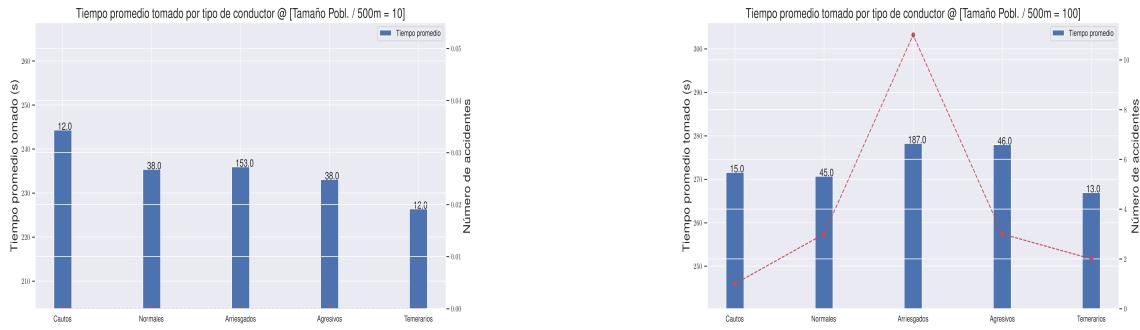


Figura 4.14: Resultados de simulación con 50% arriesgados y 50% agresivos en condiciones de poca y mucha saturación.



(a) 5% cautos + 15% normales + 60% arriesgados + 15% agresivos + 5% temerarios - Vía Poco Saturada

(b) 5% cautos + 15% normales + 60% arriesgados + 15% agresivos + 5% temerarios - Vía Saturada

Figura 4.15: Resultados de simulación con 5% cautos, 15% normales, 60% arriesgados, 15% agresivos y 5% temerarios.

incrementa, lo que indica que la presencia de conductores agresivos y temerarios afecta negativamente a la fluidez del tráfico, especialmente cuando hay un predominio de conductores arriesgados.

Si ahora comparamos en la figura 4.16 los resultados de las simulaciones de los conductores arriesgados en función de la presencia de otros tipos de conductores (siendo ellos el 100%, 50% combinado con agresivos o 60% en el caso mixto de la figura 4.15), podemos observar que la presencia de conductores agresivos reduce la mediana del tiempo que toman para terminar la travesía a costa de aumentar el número de accidentes.

Por otro lado, cuando son este tipo de conductores los que predominan (100%), el número de accidentes es el menor de los tres casos, aunque son ligeramente más lentos que en presencia de agresivos, pero más rápidos que en el caso mixto. Y por último, el caso mixto resulta el más lento para este tipo de conductores, si bien el número de accidentes es menor que con un 50% de agresivos pero mayor que con un 100% de conductores arriesgados.

Una vez que ha quedado claro cómo se comportan los diferentes tipos de conductores en función de la saturación de la vía y de la presencia de otros tipos de conductores, se puede proceder a analizar los resultados para otros tipos de combinaciones de conductores.

En la figura 4.17 se puede observar el comportamiento de cada tipo de conductor en función de la saturación de la vía de forma aislada. Se puede observar claramente como cada tipo de conductor aparece ordenado de menor a mayor tiempo de travesía, y de mayor a menor número de accidentes. Esto es, los conductores cautos son los que más tiempo tardan en completar la travesía, y los que menos accidentes provocan, mientras que los conductores temerarios son los que menos tiempo tardan en completar la travesía, y los que más accidentes provocan.

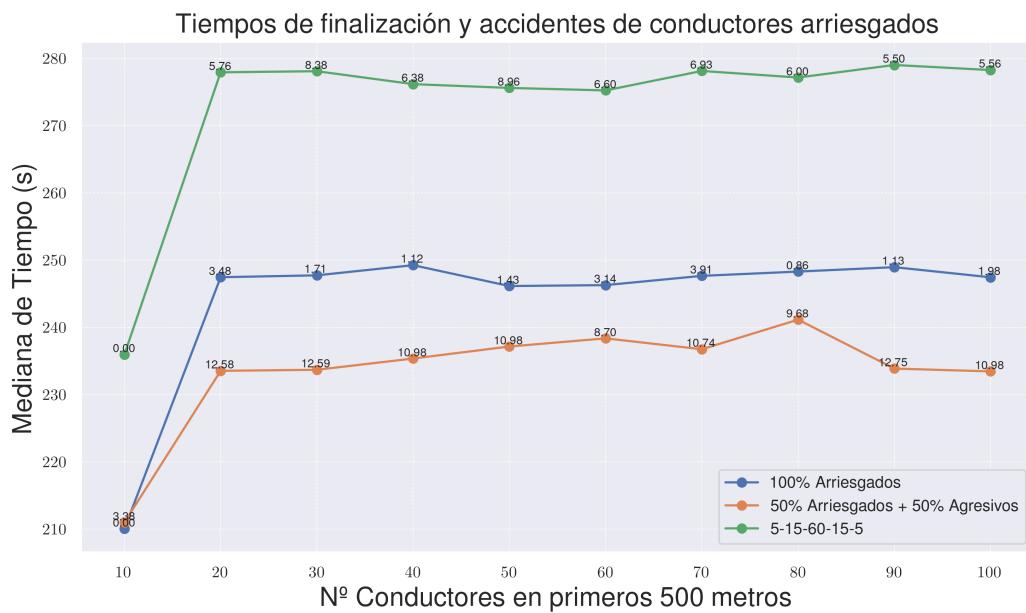


Figura 4.16: Gráfico que muestra la mediana de tiempos de conducción y accidentes para conductores arriesgados en diferentes configuraciones con otros tipos de conductores y niveles de saturación. Cada línea en la gráfica representa la mediana del tiempo promedio obtenida de las simulaciones para una configuración específica, y cada punto en esa línea representa un nivel diferente de saturación de la vía. Encima de cada punto, se muestra la mediana de accidentes de los conductores arriesgados para ese nivel y configuración. El grupo 5-15-60-15-5 es el % de cautos, normales, arriesgados, agresivos y temerarios respectivamente.

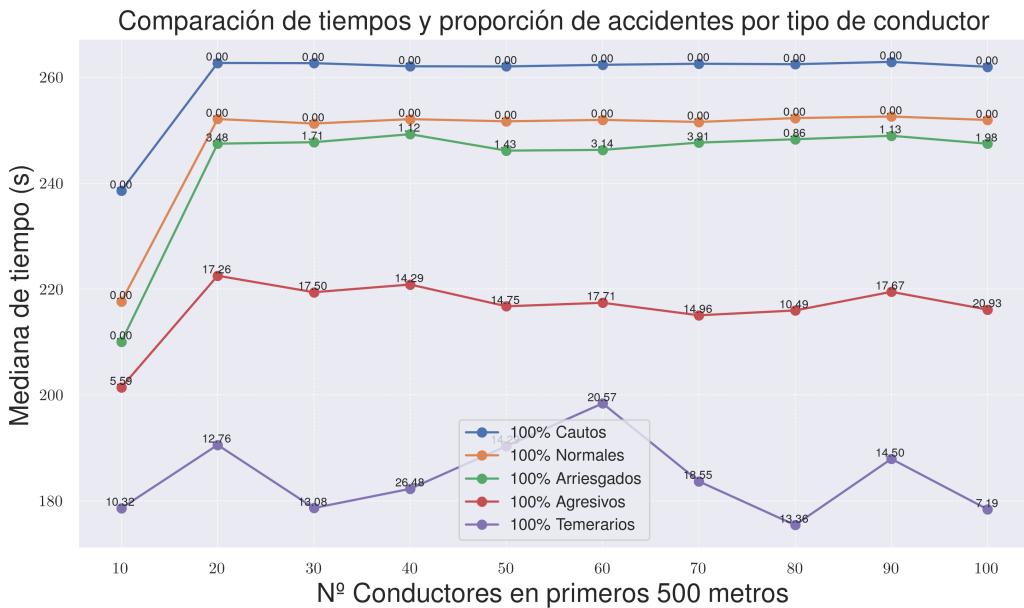


Figura 4.17: Gráfico que muestra la media de medianas de tiempos de conducción y accidentes para cada tipo de conductor en una configuración 100% pura y diferentes niveles de saturación. Cada línea en la gráfica representa la mediana del tiempo promedio obtenida de las simulaciones para un tipo de conductor en particular, y cada punto en esa línea representa un nivel diferente de saturación de la vía. Encima de cada punto, se muestra la mediana de accidentes para ese nivel y tipo de conductor.

Además, añadido al dato que se ha visto anteriormente en esta sección, se puede saber que pese a tomar más tiempo en completar la travesía, un mayor número de estos será capaz de completarla en el mismo lapso de tiempo que los conductores temerarios, ya que estos últimos provocan más accidentes y por tanto más congestión. Esto último puede observarse en la figura 4.19, en la que se muestra la evolución de los conductores que terminan la simulación en función de la saturación de la vía y de la presencia de otro grupo más agresivo.

En la figura 4.18 se puede observar una comparativa de los resultados de las simulaciones para tres tipos de situaciones, una en la que hay la misma presencia de cada tipo de conductor (equiprobable), otra en la que hay un 40% de cautos, 30% de normales, 15% de arriesgados, 10% de agresivos y 5% de temerarios, y otra en la que se sigue una distribución inversa a esta última.

La simulación con más conductores cautos y normales genera menos accidentes y tiempos similares a la equiprobable, aunque esta última tiene más accidentes. En contraste, la distribución con predominio de conductores arriesgados y agresivos provoca más accidentes, pero es la más rápida en conjunto.

Un detalle importante sobre los gráficos que incluyen resultados con conductores temerarios (y agresivos) es que no son tan estables como cuando se trata de medianas en los otros grupos, principalmente debido a lo que se mostró en la figura 4.1, donde el % de simulaciones exitosas (< 10% de accidentes) en las que estos conductores están presentes con gran proporción es menor que en los otros grupos,

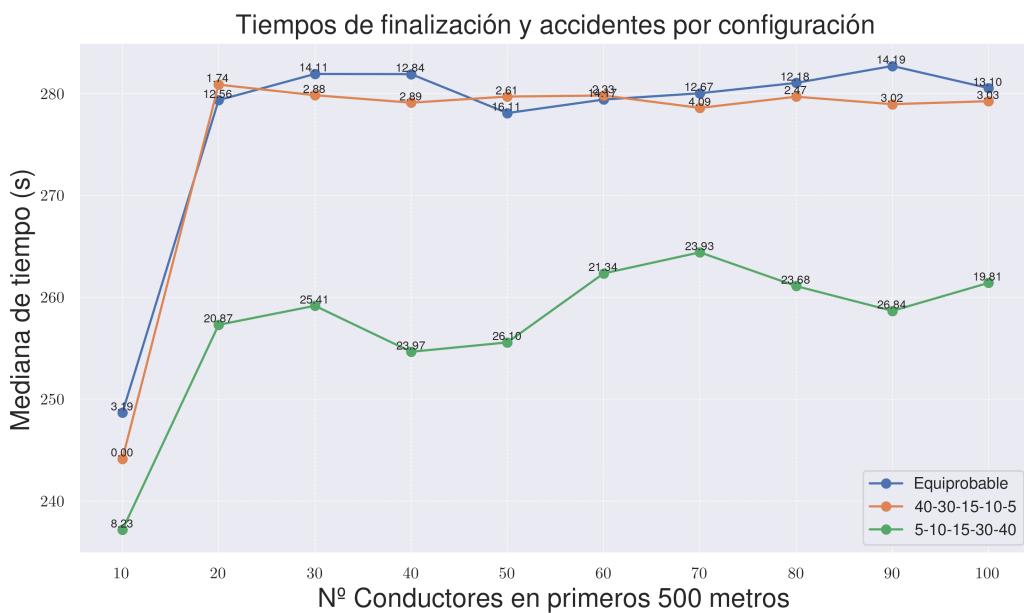
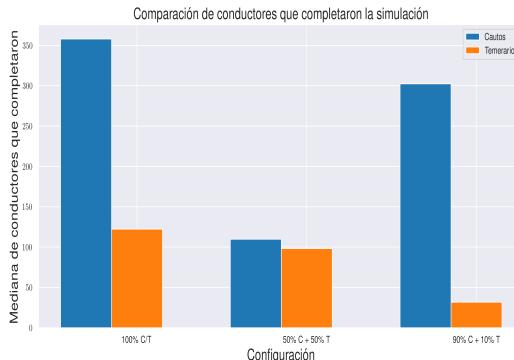
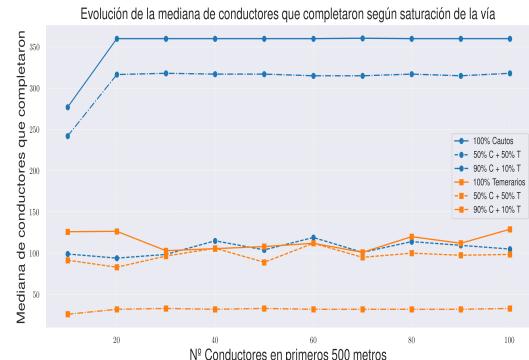


Figura 4.18: Gráfico que muestra la media de medianas de tiempos de conducción y la mediana de accidentes en diferentes configuraciones de conductores y niveles de saturación. Se calcula la mediana para cada valor en función del tipo de conductor y la saturación, y luego se calcula la media de esas medianas. Cada línea en la gráfica representa el tiempo promedio obtenido de las simulaciones para una configuración específica, y cada punto en esa línea representa un nivel diferente de saturación de la vía. Encima de cada punto, se muestra la media de accidentes para ese nivel y configuración. El grupo 40-30-15-10-5 es el % de cautos, normales, arriesgados, agresivos y temerarios respectivamente. De igual forma para el grupo 5-10-15-30-40.

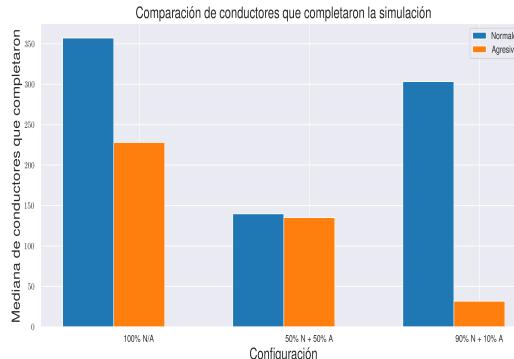
por lo que menos simulaciones se tienen en cuenta para calcular la mediana.



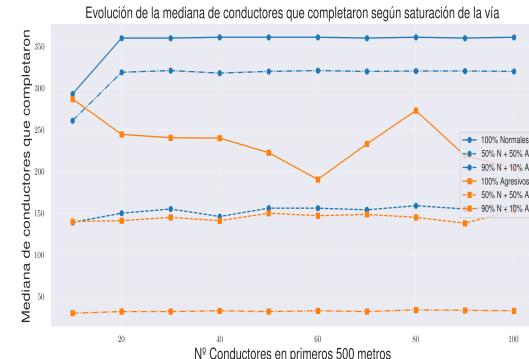
(a) Gráfico de barras - Cautos y Temerarios



(b) Evolución de finalizaciones - Cautos y Temerarios



(c) Gráfico de barras - Normales y Agresivos



(d) Evolución de finalizaciones - Normales y Agresivos

Figura 4.19: Comparativa del número de conductores que terminan exitosamente la simulación para las combinaciones de conductores cautos y temerarios, y normales y agresivos. En la primera fila se muestran los resultados para combinaciones de cautos y temerarios, y en la segunda fila para combinaciones de normales y agresivos. En la primera columna se muestra la media de las medianas para las distintas condiciones de saturación de la vía, y en la segunda columna se muestra la evolución de las medianas para cada condición de saturación. Todo ello distinguiendo los dos tipos de conductores en cada caso.

Finalmente, en la figura 4.19 se puede observar la evolución del número de conductores que terminan la simulación en dos casos distintos: en el primero, se muestran los resultados para combinaciones de cautos y temerarios, y en el segundo para combinaciones de normales y agresivos.

El gráfico de barras muestra la media de las medianas de los resultados de las simulaciones en las distintas condiciones de saturación de la vía, donde se observa de forma absoluta que cuando hay un 100% de conductores cautos hay un mayor número de conductores que terminan la simulación que en presencia de un 10% de conductores temerarios (menos incluso que si se hace la proporción del 90% correspondiente al caso con el 100%). Y se ve cómo este número de conductores que

terminan la simulación disminuye considerablemente cuando hay un 50% de conductores temerarios (cuando teóricamente debería ser la mitad del caso con el 100%). Otro hecho interesante es cómo una presencia del 100% de temerarios no obtiene mejores valores absolutos que un 50% de temerarios (en presencia de cautos), lo que indica que la presencia de conductores cautos ayuda a que los temerarios terminen la simulación.

Respecto al caso de los conductores normales y agresivos, se puede observar una situación similar a diferencia del caso con presencia del 100% de agresivos, que obtiene mejores valores absolutos que el caso con presencia del 50% de agresivos para este tipo de conductor (siendo esperable pues, en teoría, deberían finalizar el doble que en el caso con presencia del 50%, algo que no ocurre en el caso de los temerarios).

En el segundo tipo de gráfico se muestra la evolución de estas medianas en función de la saturación de la vía. En este caso se puede observar que se mantiene el resultado global que indica el gráfico de barras.

DISCUSIÓN

En este apartado se discutirán los resultados obtenidos y se compararán con los objetivos planteados en la sección 1.2.

Revisión de los principales hallazgos

A lo largo de las simulaciones realizadas, identificamos diversas dinámicas en función de la composición de los conductores y las condiciones de saturación de la vía. Específicamente, pudimos constatar que:

Los conductores arriesgados por sí solos no suelen ser causantes de accidentes excepto en condiciones de alta saturación. Sin embargo, cuando se combinan con conductores agresivos, la tasa de accidentes aumenta significativamente.

Una proporción alta de conductores temerarios puede conducir a que los conductores cautos provoquen accidentes. A pesar de ello, con una proporción menor de conductores temerarios, la tasa de accidentes sigue siendo baja.

No se observaron mejoras significativas en términos de tiempo y número de conductores que completan la carretera cuando se incluyó un grupo de conductores agresivos, independientemente de la presencia de conductores cautos o normales.

En los grupos de conductores donde los agresivos y temerarios eran predominantes, se observó que pese a que el tiempo promedio de travesía era menor, por contra, la tasa de accidentes era superior y la cantidad de conductores que terminaban la simulación exitosamente era menor en comparación con las simulaciones con grupos cautos y normales predominantes. La posible explicación es que los conductores agresivos y temerarios, al conducir de forma más imprudente, provocan accidentes y situaciones de riesgo que afectan al global de los conductores, saturando la vía y dejando secciones congestionadas, y por tanto, a la fluidez del tráfico.

Interpretación y especulación

Aquí se discutirán las implicaciones de los hallazgos y se propondrán posibles aplicaciones prácticas.

Relación entre conductores agresivos o temerarios y el resto:

Interpretación: La combinación de estos dos tipos de conductores con los demás parece generar un entorno más propenso a los accidentes. Esto puede deberse a una posible falta de previsibilidad en sus acciones, lo que lleva a reacciones en cadena, bien por apurar distancias de seguridad o velocidades, lo que en casos en que los tiempos de reacción son críticos puede provocar accidentes (un conductor de este tipo con tiempo de reacción lento difícilmente podrá evitar un accidente si el vehículo de delante frena de forma repentina).

Especulación: Si se educara a los conductores sobre los riesgos de conducir de manera agresiva o arriesgada, especialmente cuando se combina con otros estilos de conducción, podría haber una disminución en la tasa de accidentes.

Influencia de la saturación del tráfico:

Interpretación: A medida que aumenta la saturación, parece haber un aumento en la ocurrencia de accidentes, lo que sugiere que el espacio limitado y las mayores interacciones entre vehículos exacerbaban los efectos de los estilos de conducción.

Especulación: Implementar sistemas inteligentes de gestión del tráfico o diseñar infraestructuras viales más adecuadas podría mitigar los efectos negativos de la saturación.

Efectos de la diversidad de conductores:

Interpretación: Aunque uno podría pensar que tener una diversidad de estilos de conducción podría ser beneficioso para dispersar el tráfico y mejorar la fluidez, los resultados sugieren que la mezcla incorrecta puede tener el efecto opuesto, por ejemplo al incluir conductores agresivos o temerarios.

Especulación: Tal vez haya un equilibrio óptimo o proporción de diferentes estilos de conducción que maximice la eficiencia y seguridad del tráfico. Las futuras investigaciones podrían centrarse en encontrar esta proporción.

Aplicaciones prácticas:

Interpretación: Estos hallazgos pueden ser esenciales para diseñar campañas de concientización vial o para la formación de conductores.

Especulación: Con el avance de la tecnología de vehículos autónomos, estos datos podrían ser cruciales. Si entendemos cómo diferentes personalidades y estilos de conducción afectan el flujo del tráfico, podríamos programar vehículos autónomos para adaptarse a estos estilos o incluso para optimizar el tráfico en general.

Limitaciones

En este apartado se discutirán las limitaciones del estudio y se propondrán posibles mejoras.

Modelo Simplificado:

Descripción: Los modelos de simulación, aunque intentan capturar la esencia del comportamiento del tráfico, son simplificaciones de la realidad. Pueden no incluir todos los factores y variables que influyen en el comportamiento real de los conductores.

Impacto: Existen fenómenos observados en la realidad que no se manifiestan en la simulación, y viceversa.

Estilos de Conducción Predeterminados:

Descripción: El estudio clasifica a los conductores en categorías discretas (como "cauto" o "agresivo"), lo que podría no reflejar la variedad y continuidad de estilos de conducción en la realidad.

Impacto: La categorización puede conducir a interpretaciones simplificadas y no capturar comportamientos intermedios o combinados.

Condiciones Estáticas de la Simulación:

Descripción: Las condiciones de la simulación (como la configuración del tráfico o las condiciones meteorológicas) permanecen constantes, a diferencia de las condiciones variables en carreteras reales.

Impacto: Los resultados pueden no reflejar completamente cómo reaccionarían los conductores ante cambios en el entorno.

No Consideración de Factores Humanos Complejos:

Descripción: Factores como el cansancio, distracciones, decisiones impulsivas o habilidades de conducción no se incorporan en el modelo. Lizbetin [4] sugiere que estos factores tienen un impacto significativo en el comportamiento del conductor.

Impacto: La simulación puede subestimar o sobreestimar ciertos comportamientos o resultados en situaciones reales.

Generalización de Resultados:

Descripción: Aunque los resultados de la simulación ofrecen perspectivas valiosas, la generalización de estos hallazgos a todos los contextos y situaciones del tráfico podría ser prematura.

Impacto: Las recomendaciones o intervenciones basadas en estos resultados deben aplicarse con precaución en contextos diferentes al de la simulación.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 Conclusiones

El análisis detallado de las simulaciones de tráfico ha arrojado luz sobre cómo diferentes estilos de conducción interactúan entre sí y cómo estos influyen en la eficiencia y seguridad del tráfico. Una conclusión clave es que, si bien los conductores agresivos pueden parecer eficientes individualmente, su presencia en combinación con conductores de otros estilos puede desencadenar una mayor tasa de accidentes y disminuir la eficiencia general del sistema. Esta dinámica es particularmente pronunciada en situaciones de alta saturación.

Además, es esencial considerar la simplicidad del modelo de simulación. Aunque ha proporcionado resultados valiosos, tiene sus propias limitaciones. Los factores humanos complejos, las condiciones cambiantes y la variabilidad real de los estilos de conducción no están completamente representados en el modelo. A pesar de estas limitaciones, los resultados ofrecen una dirección clara para futuras políticas y estrategias a seguir: equilibrar la eficiencia y la seguridad requiere una comprensión más profunda de cómo interactúan los diferentes estilos de conducción.

En resumen, este estudio subraya la importancia de considerar el comportamiento del conductor en la gestión y planificación del tráfico. A medida que nuestras ciudades crecen y la infraestructura de transporte se convierte en una parte crucial de la vida urbana, las decisiones basadas en la comprensión de las interacciones entre diferentes estilos de conducción pueden resultar fundamentales para aliviar los atascos, reducir accidentes y mejorar la movilidad general. Con la integración de tecnologías avanzadas, como la conducción autónoma y sistemas de monitoreo en tiempo real, se presenta una oportunidad única de aplicar estas lecciones aprendidas. Sin embargo, el éxito de estas tecnologías y estrategias dependerá de cómo abordemos y consideraremos la diversidad de comportamientos en la carretera. Por lo tanto, entender y abordar estas dinámicas no es solo una recomendación, sino una necesidad imperativa para las futuras generaciones de sistemas de transporte.

6.2 Trabajo Futuro

La investigación presentada ha proporcionado valiosas ideas sobre cómo los diferentes estilos de conducción pueden influir en la dinámica del tráfico. Sin embargo, como todo modelo, tiene sus limitaciones inherentes, lo que nos conduce a varias direcciones prometedoras para futuros trabajos.

Modelo más complejo

Aunque este estudio abordó varios comportamientos de conducción, es esencial considerar un modelo que incorpore más variables humanas, como distracciones, fatiga o influencia del clima, para obtener un panorama más completo de las dinámicas reales del tráfico.

Entorno más diverso

El modelo podría extenderse para abordar diferentes tipos de infraestructuras viales, desde carreteras rurales hasta complejos intercambios urbanos, con el fin de validar si los patrones observados se mantienen consistentes en diferentes contextos.

Interacción con vehículos autónomos

A medida que la tecnología avanza, se espera que los vehículos autónomos se incorporen cada vez más al tráfico convencional. Investigar cómo estos vehículos interactuarán con conductores humanos, especialmente los de comportamientos extremos, será crucial.

Políticas y normativas basadas en datos

Con una comprensión más profunda de estas interacciones, se puede trabajar en el diseño de políticas y regulaciones más efectivas que fomenten estilos de conducción seguros y eficientes.

Herramientas de educación y concienciación

Basándose en los resultados, se pueden desarrollar programas educativos dirigidos a enseñar a los conductores sobre los riesgos asociados con ciertos comportamientos, utilizando simulaciones y escenarios derivados directamente del estudio.

En última instancia, la finalidad es contribuir a la creación de sistemas de transporte más seguros, eficientes y resilientes, adaptados a los desafíos emergentes del siglo XXI. Para ello, la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, psicólogos, urbanistas y otros expertos será esencial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Leutzbach, *Introduction to the Theory of Traffic Flow*, vol. 204. Springer_Verlag Berlin Heidelberg, 1988.
- [2] C. F. Daganzo, “A behavioral theory of multi-lane traffic flow part i: Long homogeneous freeway sections,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 36, no. 2, pp. 131–158, 2002.
- [3] Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S. Tadaki, and S. Yukawa, “Traffic jams without bottlenecks—experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam,” *New Journal of Physics*, vol. 10, p. 033001, 2008.
- [4] J. Lizbetin and L. Bartuska, “The influence of human factor on congestion formation on urban roads,” in *Procedia engineering*, vol. 187, pp. 206–211, 2017.
- [5] S. Siuhi, M. Mamun, and J. Mwakalonge, “The significance of the posted minimum speed limits along interstate highways in South Carolina on traffic operation and safety,” *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021.
- [6] L. James and D. Nahl, *Road Rage and Aggressive Driving: Steering Clear of Highway Warfare*. Prometheus Books, 2000.
- [7] C. S. Dula and M. E. Ballard, “Development and evaluation of a measure of dangerous, aggressive, negative emotional, and risky driving,” *Journal of Applied Social Psychology*, vol. 33, no. 2, pp. 263–282, 2003.
- [8] P. Ulleberg and T. Rundmo, “Personality, attitudes and risk perception as predictors of risky driving behaviour among young drivers,” *Safety Science*, vol. 41, no. 5, pp. 427–443, 2003.
- [9] J. L. Deffenbacher, D. M. Deffenbacher, R. S. Lynch, and T. L. Richards, “Anger, aggression, and risky behavior: A comparison of high and low anger drivers,” *Behaviour Research and Therapy*, vol. 41, no. 6, pp. 701–718, 2003.
- [10] D. Fisher, M. Rizzo, J. Caird, and J. Lee, *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. 01 2011.
- [11] D. Shinar, *Traffic Safety and Human Behavior*. Elsevier, 2 ed., 2017.
- [12] K. T. K. Teo, W. Y. Kow, and Y. Chin, “Optimization of traffic flow within an urban traffic light intersection with genetic algorithm,” in *2010 Second International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation*, pp. 172–177, IEEE, 2010.

APÉNDICES

DETALLES DEL MODELO Y GUÍA DE USO

Este apéndice detalla la estructura del modelo de simulación usado en el estudio, incluyendo un diagrama de clases y orientaciones para replicar las simulaciones. Se busca facilitar la reproducibilidad de las simulaciones y permitir la adaptación del trabajo.

A.1 Detalles del Modelo

En esta sección se detallará la estructura del modelo de simulación usado en el estudio, incluyendo un diagrama de clases y una explicación breve de las clases principales.

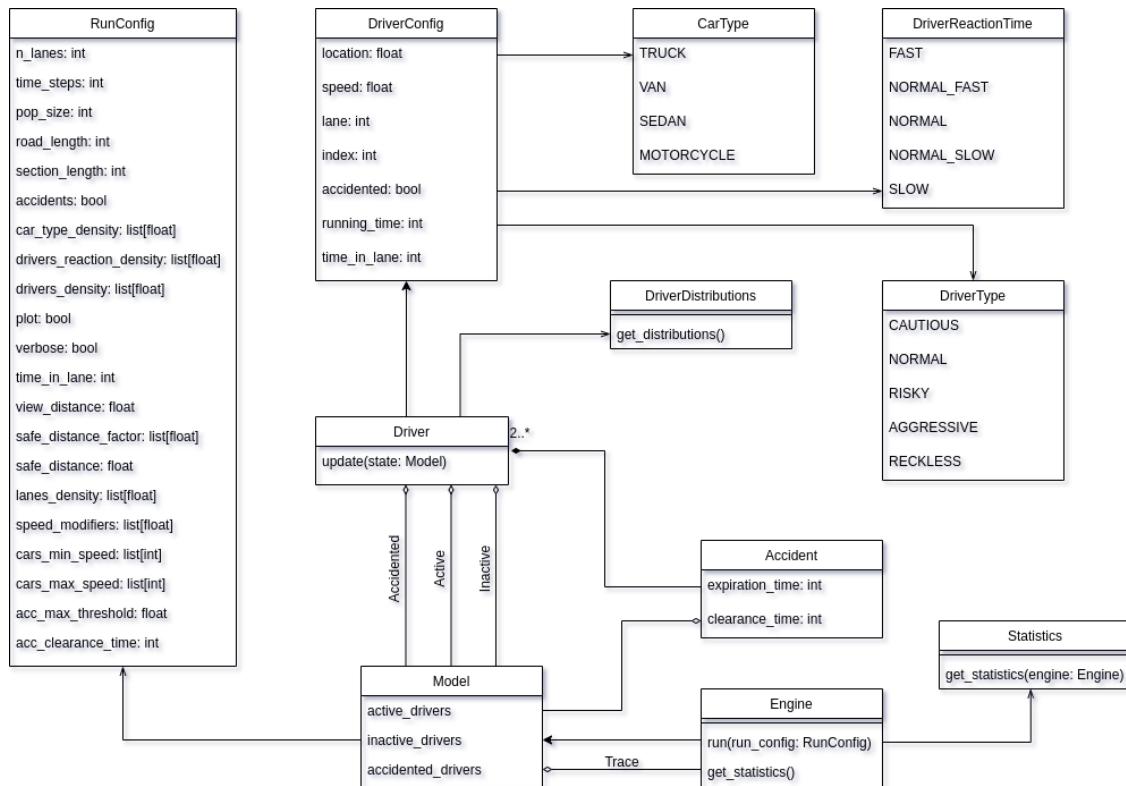


Figura A.1: Diagrama de clases del modelo de simulación. Se han omitido la mayoría de métodos y atributos no principales para facilitar la comprensión del diagrama.

Engine

Clase principal del modelo. Se encarga de inicializar el sistema y ejecutar la simulación. En cada iteración de la simulación se encarga de actualizar el estado del sistema y de recopilar los datos necesarios para el análisis. Contiene el modelo en simulación y su histórico.

Model

Clase que representa el modelo de simulación. Contiene los métodos principales para actualizar el estado del sistema. Es la clase que contiene los conductores, los accidentes y la vía.

RunConfig

Clase que representa la configuración de una simulación. Contiene los parámetros de la simulación, como la densidad de tráfico, la saturación, el número de carriles, etc. Se encarga de cargar los datos de un fichero de configuración. Se usa como parámetro para la clase Engine.

Driver

Clase que representa a un conductor. Contiene los métodos para actualizar el estado del conductor, como la velocidad, la posición, el tiempo de conducción, etc. Se asocia con un tipo (DriverType), que determina el comportamiento del conductor; un tiempo de reacción, DriverReactionTime, que determina el tiempo que tarda el conductor en reaccionar ante un accidente; y un tipo de vehículo, CarType.

DriverType

Clase que representa un tipo de conductor. Puede ser CAUTIOUS, NORMAL, RISKY, AGGRESSIVE o RECKLESS.

DriverReactionTime

Clase que representa el tiempo de reacción de un conductor. Puede ser FAST, NORMAL, FAST, NORMAL, NORMAL SLOW o SLOW.

CarType

Clase que representa el tipo de vehículo de un conductor. Puede ser TRUCK, VAN, SEDAN o MOTORCYCLE.

DriverDistributions

Clase que contiene las distribuciones de probabilidad de los conductores. Se usa para generar los conductores de forma aleatoria, inicializar y actualizar sus velocidades, generar el tiempo que han de permanecer en el carril, etc.

Accident

Clase que representa un accidente. Contiene los métodos para actualizar el estado del accidente, como el tiempo de duración, el tiempo restante hasta ser limpiado y los conductores implicados.

Statistics

Clase que contiene los datos estadísticos de la simulación. Se encarga de recopilar los datos necesarios para el análisis.

El modelo está pensado de forma que pasando como parámetro un objeto de la clase `RunConfig`, que carga los datos de un fichero de configuración (`config.py`), se pueda modificar de forma sencilla los parámetros de este mismo y pasar este objeto como argumento a la clase `Engine`. De esta forma se puede ejecutar el modelo con diferentes configuraciones de forma sencilla.

A.2 Guía de Uso

Para replicar y/o modificar las simulaciones realizadas en este estudio, es necesario ajustar los parámetros específicos dentro de la clase `RunConfig` (o bien directamente sobre el fichero de configuración `config.py`, aunque en el caso de querer parametrizar las simulaciones la ruta a seguir es alterar los valores de `RunConfig` una vez cargados). Esta clase se encarga de cargar los datos de configuración para cada simulación, y se pueden ajustar según las necesidades o intereses del usuario.

A continuación, se proporciona un código de ejemplo para replicar las simulaciones realizadas en este estudio, que se puede consultar en A.1.

Código A.1: Se muestra un ejemplo de cómo cargar la configuración de una simulación a partir de la clase `RunConfig` y ejecutar la simulación con esta configuración.

```

1 from engine import Engine
2 from config import Config
3 from run_config import RunConfig
4
5 def run_simulation():
6     config = Config() # Cargar configuración
7     run_config = RunConfig(config) # Cargar configuración de ejecución
8
9     engine = Engine(run_config) # Crear motor de simulación
10    engine.run() # Ejecutar simulación

```

Si se desea realizar cambios, o bien parametrizar las simulaciones, se puede realizar lo observado en A.2, donde se muestra el código necesario para realizar las simulaciones correspondientes al primer caso de la tabla 3.5.

Código A.2: Se muestra un ejemplo de cómo cargar la configuración de una simulación a partir de la clase `RunConfig` y ejecutar la simulación con esta configuración. Este código se corresponde con el primer caso de la tabla 3.5.

```
1 import time
2 import logging
3 from engine import Engine
4 from config import Config
5 from run_config import RunConfig
6 from stats import Stats
7
8 REPEATS = 200
9
10 def simulation():
11     results = []
12
13     config = Config()
14     run_config = RunConfig(config)
15
16     run_config.section_length = 500
17     run_config.road_length = 5000
18     run_config.n_lanes = 2
19     run_config.time_steps = 1000
20     run_config.driver_type_density = [1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]
21     run_config.verbose = False
22     run_config.accident_max_threshold = 0.10
23
24     population_sizes = [a for a in range(10, 110, 10)]
25
26     for i in range(0, 10):
27         run_config.population_size = population_sizes[i]
28
29         for j in range(0, REPEATS):
30             engine = Engine(run_config)
31             engine.run()
32
33             # Check if the simulation was valid (accidents < 10%)
34             if not engine.validate_simulation():
35                 # ... manage the error
36
37             stats = Stats(engine=engine)
38             results.append(stats)
39
40             # ... print time
41             # ... save results to file
```