

Optimización de tiempos de fase en Semáforos
Actuados centrado a su progresión en red en un
Sistema de Gestión

Mario Azziel Merlos
Molina

2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Optimización de tiempos de fase en Semáforos Actuados centrado
a su progresión en red en un Sistema de Gestión

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en:

Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Mario Azziel Merlos Molina

Dirigido por:

M.I. Marco Luis Dorado Pineda

Querétaro, Qro. a 28 de febrero del 2020



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Optimización de tiempos de fase en Semáforos Actuados centrado a su
progresión en red en un Sistema de Gestión

Opción de titulación

Tesis o Publicación de artículos

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería

Presenta:

Mario Azziel Merlos Molina

Dirigido por:

M.I. Marco Luis Dorado Pineda

M.I. Marco Luis Dorado Pineda

Presidente

Dr. Saúl A. Obregón Biosca

Secretario

Dr. José Antonio Romero Navarrete

Vocal

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Suplente

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Suplente

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Fecha: febrero de 2020

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar los tiempos óptimos de la señal de tráfico en tiempo real mediante el uso de sensores que miden la presencia y la ocupación del tráfico en un eje. Lo anterior se hizo para reducir los retrasos. Para determinar los tiempos óptimos del semáforo, se desarrolló un algoritmo que se alimenta a través de los sensores para la elección óptima de la señal. La microsimulación se utilizó para determinar el comportamiento del algoritmo y su eficiencia en comparación con las condiciones reales. Los resultados de la investigación fueron una mejora que redujo los retrasos, el tiempo de parada, el tiempo de viaje y un aumento de la velocidad. También se desarrolló la coordinación entre las intersecciones, en este caso se optó por usar el software de microsimulación Aimsun que tiene una plataforma para poder programar el algoritmo que se desarrolló para hacer la simulación y comparar los resultados con la simulación del estado actual de la vialidad. El caso de estudio es la red de la avenida Constituyentes de la Ciudad de Querétaro.

Palabras clave: Semáforos; microsimulación; algoritmo

ABSTRACT

The objective of this work was determined the optimal traffic signal times in real time through the use of sensors that measure the presence and occupation of traffic in an axis. The above was done in order to reduce delays. To determine the optimal traffic light times an algorithm was developed that is fed through the sensors for the optimal time signal choice. Microsimulation was used to determine the behavior of the algorithm and its efficiency compared with the actual conditions. The results of the research were an improvement reducing delays, stop time, travel time, and an increase in speed. Also, Coordination among intersections was developed, in this case were chosen to use the microsimulation software Aimsun that has a platform to program the algorithm which was developed to do the simulation and compare the results with the simulation of the current state of the road. The case of study is the Constituyentes avenue in Querétaro city.

Key words: traffic lights, microsimulation, algorithm

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Esta tesis está dedicada a mi hermano Q.E.P.D. José Luis Merlos Molina

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera cordial al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado durante el desarrollo de la maestría, a mis padres y hermanos, así como a mis seres queridos, todos ellos han puesto de una u otra manera su granito de arena que se ha transformado en energía e impulso para poder culminar esta meta. Infinitas gracias a todos ellos. También agradezco a mis profesores por guiarme por el camino del conocimiento y brindarme de su sabiduría.

Dirección General de Bibliotecas UNAM

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 ANTECEDENTES.....	10
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3 JUSTIFICACIÓN	12
1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	13
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1 CONTROL DE TRÁNSITO	14
2.2 SISTEMAS DE TRANSPORTE INTELIGENTE (ITS)	17
2.2.1 <i>Usuarios de los ITS</i>	18
2.2.2 <i>Servicios a los usuarios de ITS</i>	19
2.2.3 <i>Aplicación de ITS al control de tráfico en intersecciones</i>	21
2.3 SIMULACIÓN DE TRÁFICO	22
2.3.1 <i>Principios de la modelación del tráfico</i>	23
2.4 ALGORITMOS APLICADOS AL CONTROL DE TRÁFICO.....	26
3. METODOLOGÍA.....	30
3.1 OBTENCIÓN DE DATOS DE CAMPO	30
3.2 SIMULACIÓN DE LA RED.....	32
3.2.1 <i>Validación y calibración</i>	35
3.2.2 <i>Modelos ambientales</i>	43
<i>Escenario con Semáforos Actuados</i>	45
3.3 ESCENARIO CON SEMÁFOROS COORDINADOS	51
3.4 ESCENARIO CON SEMÁFOROS COORDINADOS CON PRIORIDAD AL TRANSPORTE PÚBLICO.....	53
3.5 APLICACIÓN DEL ALGORITMO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	54
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
5. CONCLUSIONES.....	66
6. REFERENCIAS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparativa de aplicación de algoritmos a semáforos.....	29
Tabla 4-1. Estadística para el modelo de validación- Vista de Tabla.....	58
Tabla 4-2 Comportamiento de la red en los escenarios desarrollados	59
Tabla 4-3. Contaminantes producidos durante el periodo de simulación.....	64
Tabla 4-4. Resultados de la simulación del transporte público	65

Dirección General de Bibliotecas UAO

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 3-1.</i> Esquema de desarrollo de Metodología	30
<i>Figura 3-2.</i> Eje vial de estudio.....	32
<i>Figura 3-3.</i> Pasos en la simulación de estudio	34
<i>Figura 3-4.</i> Comparativa gráfica de datos reales con simulados mediante detectores	41
<i>Figura 3-5.</i> Estadística para el modelo de validación- Vista de Regresión	41
<i>Figura 3-6.</i> Estadística para el modelo de validación- Vista de Tabla.....	42
<i>Figura 3-7.</i> Ubicación de los sensores en escenario coordinado.....	52
<i>Figura 3-8.</i> Diagrama del algoritmo de activación de las fases semafóricas	53
<i>Figura 4-1.</i> Comparativa gráfica de datos reales con simulados mediante detectores	56
<i>Figura 4-2</i> Estadística para el modelo de validación- Vista de Regresión	57
<i>Figura 4-3.</i> Comparativo de las demoras de los escenarios	60
<i>Figura 4-4.</i> Comparativo de las velocidades promedio de los escenarios	61
<i>Figura 4-5.</i> Comparativo del número de paradas promedio de los escenarios	62
<i>Figura 4-6.</i> Comparativo del tiempo de paradas promedio de los escenarios	62
<i>Figura 4-7</i> Comparativo del flujo de los escenarios	63

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El transporte influye directamente en el desarrollo de la economía como lo señalan Hurter & Moses (1964), en donde establecen que se puede tener un efecto crítico en la economía de las diferentes regiones del mundo debido a la inversión en la infraestructura del transporte que se realice, dando como resultado que este factor pueda estimular o retrasar el desarrollo de la región. Entonces, el transporte tanto como de mercancías como de personas es de suma importancia para el desarrollo de las poblaciones. Por ello, la eficiencia en el transporte es un factor importante para contribuir a dicho desarrollo permitiendo la movilidad hacia múltiples destinos. Una mala planeación de una población trae consecuencias negativas en la movilidad, como lo mencionan Novikov, Novikov, Katunin, & Shevtsova (2017), ellos hacen referencia a que el desarrollo de infraestructura se da en circunstancias en las que no están al nivel de motorización adecuado, trayendo consigo problemas en el transporte por lo que para optimizar el transporte se ha desarrollado sistemas de transporte inteligente que los definen como un sistema en el que se aplican las tecnologías de la información y comunicaciones orientadas al transporte y su interacción intermodal. Como resultado de lo antes mencionado, algunas afectaciones como las demoras implican un aumento en los costos operacionales, además de otras afectaciones como las relacionadas con la contaminación, éstas se ven disminuidas por el uso de estos sistemas de transporte inteligentes.

Referente a lo anterior, existen algunos elementos de infraestructura en el transporte que generan mayores demoras, tal es el caso de las intersecciones, relacionado a esto Gorodokin, Almetova, & Shepelev, (2016) hacen mención de que dichos elementos son difíciles y peligrosos debido a la unión entre la calle y la red de caminos con concentraciones altas de tráfico en estos puntos de conflicto.

La necesidad de obtener resultados más eficientes en el ámbito del transporte, se han desarrollado los llamados Sistemas de Transporte inteligentes,

referente a estos Moisis (2016) señala que los sistemas de Transporte Inteligentes (ITS por sus siglas en inglés) han recibido una mayor atención tanto desde el punto de vista académico como del industrial basándose en el incremento de la demanda para el desarrollo de transporte. Sin embargo, no es fácil el desarrollo de los modelos para el uso de ITS, relacionado a ello, (Liu, Slotine, & Barabási, 2011) afirman. “Existen dos factores independientes que hacen difícil el control de los sistemas: la arquitectura del sistema, representada por la red física, y las reglas dinámicas de captura de las interacciones tiempo dependientes entre la red de componentes”. He & Hou (2016) por su parte, dividen a los Sistemas de Transporte Inteligente en seis grandes grupos: i) Sistemas avanzados de gestión de transporte, ii) Sistemas avanzados de información de viajeros, iii) Sistemas avanzados de control de vehículos, iv) Gestión de vehículos de negocios, v) Sistemas avanzados de transporte público y vi) Sistemas avanzados de transporte urbano.

Se ha observado que la implementación de los ITS ha permitido aminorar diversos problemas del transporte como es señalado por Gorodokin *et al.* (2016) en donde menciona que al implementar los Sistemas de Transporte Inteligentes, estos reducían los retrasos de vehículos, el decremento en el número involuntario de paradas en las intersecciones, mejoras en el ambiente, la eliminación parcial o total de la congestión de las zonas más críticas de la red de caminos y la reducción del número de accidentes de tráfico. Respecto a esto, se han observado buenos resultados al combinar Sistemas Inteligentes de Transporte con la optimización de semáforos reduciendo de manera significativa las demoras.

1.2 Descripción del problema

Actualmente existe una problemática en el transporte en la Ciudad de Querétaro, debido al desarrollo acelerado que ha tenido en los últimos años trayendo como consecuencia un aumento en el tráfico de vehículos que ha desencadenado en múltiples problemas como es la contaminación, los congestionamientos, las demoras, accidentes viales, entre otros. Sobre todo, esto

sucede en algunos elementos de infraestructura como es el caso de las intersecciones. Debido a lo anterior, se han implementado sistemas con los que se trata de controlar las problemáticas antes mencionadas mediante semaforización. Aunque se cuenta con estos elementos de control, no se ha realizado un modelo que permita verificar la eficiencia de dichos semáforos lo que permitiría obtener los ciclos óptimos para cada intersección y de esta manera reducir los problemas antes mencionados.

1.3 Justificación

Una de las razones por las que se tienen problemas en las intersecciones es debido a que se realiza una mala planeación, además se integran sistemas tales como los semáforos con la finalidad de controlar el flujo vehicular. Sin embargo, como lo menciona Kergaye, Stevanovic, & Martin (2010), estos sistemas son implementados sin antes haber sido simulados para obtener una optimización de los ciclos de los semáforos trayendo consecuencias negativas en el flujo vehicular. Por otro lado, Gorodokin *et al.* (2016) comenta que muchas veces al no haber hecho un análisis de los ciclos de los semáforos en las intersecciones provocan que sean peligrosos debido a que muchas veces el tiempo es insuficiente no solamente para el flujo de vehículos sino para los peatones que son los usuarios más desprotegidos. Mediante la simulación se han realizado múltiples investigaciones para el estudio de los ciclos de semáforos en intersecciones, relacionado con ello Vilarinho, Soares, Macedo, Tavaresa, & Rosetti (2014) obtuvieron resultados satisfactorios mediante la implementación de un algoritmo para el desarrollo de tiempos de semáforo con microsimulación con lo cual se logró que se evitara la saturación de la red y reduciendo las demoras. Además, se puede ver en la investigación de He & Hou (2012) que mediante un algoritmo lograron una reducción en las demoras, en el número de paradas y la capacidad de la red. En adición, Rattin, Chapline, & Williams (2002) afirman que cuando se tienen señales sincronizadas semaforicas de manera actualizada se obtienen beneficios tales como una mejora en la calidad del aire, la seguridad del tráfico y una reducción en la frustración de los conductores.

1.4 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

HIPÓTESIS

La implementación de un algoritmo que considere la detección vehicular en tiempo real dentro de un sistema de Gestión de Tráfico que disminuirá al menos un 15% las demoras inducidas por el sistema semafórico de un eje vial

OBJETIVO

Mediante la consideración de detectores virtuales desarrollar un algoritmo en un sistema de gestión de tráfico aplicado a parte de una de las redes principales con la finalidad de la disminución de las demoras provocadas debido a las intersecciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Control de Tránsito

El crecimiento de la urbanización ha ido de la mano con el crecimiento de las ciudades como lo menciona Gou, Li, & Ban (2019), también señalan que este crecimiento lleva como consecuencia el incremento de la congestión vehicular, de accidentes y la rápida demanda de viajes. Relacionado a lo anterior, Edara, Teodorovic´, Triantis, & Natarajan (2011) hacen referencia a que al aumentar la cantidad de viajes en automóvil también aumentan las vialidades y la demanda de estas, lo que trae como consecuencia que las vías urbanas principales se vean congestionadas resultando en el aumento en tiempos de viajes, mayor número de paradas, retrasos inesperados, mayores costos de viaje, aumento en la contaminación del aire y nivel de ruido, así como incremento en el tráfico.

En el análisis de la demanda de tráfico, Black (2003) señala que la previsión de la demanda de tráfico se basa en una estimación precisa del tiempo de viaje entre ubicaciones en varios usos de suelo, en adición, Huff (2003), resalta que las necesidades de análisis del área comercial, el tiempo de viaje entre cada tienda y cada área residencial, son factores que afectan la previsión de la demanda del tráfico.

De acuerdo con Teodorovic´ & Janic´ (2017), la mayoría de las intersecciones en el mundo no se encuentran semaforizadas debido a los bajos volúmenes de tráfico y/o distancias de visión aceptables. Sin embargo, a mayores volúmenes de tráfico y/o frecuencia y dureza de los accidentes de tráfico se hace necesario el control semafórico de tránsito o tráfico. Además, definen al control de tránsito como la representación de una supervisión de los movimientos de los vehículos y peatones, con la intención de garantizar la máxima eficiencia y seguridad de movimientos conflictivos. En adición, describe que los semáforos o señales de

tráfico son los dispositivos básicos utilizados en el control de tráfico que advierten, controlan y/o dirigen los movimientos del tráfico en una intersección, y se ubican en la carretera, intersecciones y/o cruces peatonales.

El medio ambiente también se ve afectado por el aumento de los vehículos, por lo que los encargados del desarrollo de políticas para el control de emisiones contaminantes de los vehículos se apoyan en algunas ocasiones de los modelos de microsimulación (Amirjamshidi & Roorda, 2017). De acuerdo con Leal, de Almeida, & Chung (2017), la tendencia del transporte tanto público como privado es de aumentar de manera considerable trayendo consecuencias como el crecimiento de la congestión urbana y a su vez el aumento en los tiempos medios de viaje y los tiempos de demora, largas filas de espera y un alto número de paradas en los semáforos dando como resultado un aumento en las emisiones contaminantes.

Uno de los aspectos importantes a analizar en las vialidades es el de la seguridad vial, Caliendo & Guida (2012) mencionan que existe actualmente la necesidad de desarrollar indicadores de seguridad que puedan permitir un análisis preventivo de la seguridad sin tener que esperar que ocurra un accidente con ventajas como son: i) evaluación de seguridad vial más rápida y eficiente ,ii) mejor comprensión de la relación del comportamiento del usuario y el riesgo de accidente, así como obtener conocimiento de los elementos de diseño, iii) caracterizando más claramente el proceso del riesgo de colisión en condiciones de tráfico normal y/u hora pico.

También se ha analizado el comportamiento de los peatones como lo muestra la investigación de Palat & Delhomme (2014), en la que señalan que, en el tráfico pesado, el primer conductor en una fila de vehículos esperando en una luz roja debería comenzar poco después, la luz cambia de rojo a verde para permitir que la mayor cantidad posible de automóviles atraviese la intersección durante la fase de luz verde. Pero antes de comenzar, el conductor debe verificar si todos los

peatones se han salido del paso de peatones y si la intersección está libre de corredores de luz roja.

Por su parte Godthelp, Milgram, & Blaauw (1984), dicen que cuando los conductores creen que les falta tiempo, es posible que quieran acelerar, lo que a su vez reduce el margen de tiempo de colisión. Parar en un semáforo amarillo o rojo es diferente de detenerse ante un obstáculo fijo o en movimiento por lo que detenerse ante una luz amarilla o roja no implica necesariamente una colisión. Como una medida de control de tiempo cuando hay poca disponibilidad de tiempo, los conductores pueden intentar pasar por la luz amarilla a pesar de que están lo suficientemente lejos como para detenerse de forma segura antes de la intersección (Porter & Berry, 2001). En adición a lo anterior, se puede señalar de acuerdo con Fuller, McHugh, & Pender (2008), que los usuarios pueden percibir que no existe riesgo al cruzarse cuando la luz se encuentra en ámbar, esto debido a que no ven obstáculos en la vía que les pudieran hacer perder el control del vehículo provocando problemas de accidentalidad en las intersecciones.

Una arteria puede corresponder a una calle de un solo sentido o a una avenida. El control de tránsito en una arteria implica la elección de un tiempo de ciclo, un reparto del tiempo de verde a las fases de intersección y una secuencia de encendido de la luz verde de semáforos a lo largo de la arteria; esta secuencia de encendido, esta se denomina coordinación. Otros criterios que es posible adoptar en el diseño de una coordinación son el de mínima demora y el del número de paradas; o bien una combinación de ambos, elegida como representación analítica de la condición ideal de operación.

El flujo de vehículos en una red urbana presenta aspectos relevantes que justifican un tratamiento algo más elaborado que la coordinación en un conjunto de arterias. Sin embargo, dada la complejidad de este problema, el ingeniero de tránsito tiene al alcance soluciones relativamente simples, cuya eficiencia es generalmente limitada. Entre estas opciones, la más frecuentemente usada,

consiste en diseñar coordinaciones para las calles y avenidas principales, para luego ajustar, generalmente en el campo, los desfases en el resto de las calles que forman la red, conservando los repartos y el tiempo de ciclo. El ajuste que debe practicarse se refiere entonces a la secuencia de encendido de la luz verde de los semáforos que actúan bajo el mismo control maestro. Generalmente en esta solución y ajuste se buscan el máximo ancho de banda, como criterio que permita medir la eficiencia. El uso de la computadora permite plantear una optimización desde el punto de vista del desarrollo de algoritmos. La coordinación de semáforos se plantea como un problema de optimización, de manera que se busca optimizar el flujo de la red urbana en la que operan los semáforos; ya sean controlados por computadora u operando bajo la supervisión de un control maestro, con tiempos fijos durante ciertas horas del día. En la optimización del flujo vehicular, el propósito es determinar aquella combinación de repartos y desfases que, para un cierto tiempo de ciclo, garantiza la mínima demora por vehículo, o el número de paradas o, finalmente, una combinación aritmética de ambas.

2.2 Sistemas de Transporte Inteligente (ITS)

Existen innovaciones en el área del transporte que ayudan a proveer soluciones a lo antes mencionado, tal es el caso de los ITS, que de acuerdo a Jarašūniene (2007) su propósito es el de recopilar información sobre las condiciones del tráfico, flujos de tráfico en las carreteras y presentarlo en forma concisa para sistemas de control como es el caso de los GPS, rutas de control de transporte público como del comercial, pago electrónico y sistemas de recaudación de impuestos, entre otros.

Los fabricantes de carros han desarrollado tecnologías para producir carros más seguros, que hagan el manejar menos estresante y más confortable. Muchas de estas nuevas tecnologías pueden encontrarse también en buses y trenes. Las tecnologías avanzadas cada vez son más utilizadas para manejo de grandes redes

de transporte público, y para brindar información entre los pasajeros sobre la llegada trenes y buses.

Dentro del sector del transporte de mercancías una gran variedad de tecnologías es aplicadas para facilitar el movimiento eficiente de los vehículos y de las transacciones comerciales asociadas como parte de la cadena de suministro.

Colectivamente, las múltiples tecnologías se conocen como sistemas de transporte inteligente (ITS). Cuando son cuidadosamente aplicados, los ITS pueden hacer del sistema de transporte algo más seguro, más eficiente, además de reducir el impacto ambiental que estos causan.

Por otra parte, los ITS no pueden remplazar la necesidad de una política de transporte coherente ni la disposición de instituciones competentes e infraestructura adecuada.

El reto para las ciudades en desarrollo y desarrolladas es entender como los ITS pueden ayudar en el manejo de sus sistemas de transporte, crear las bases para un desarrollo progresivo y coordinado con los ITS, y desarrollar experiencia y competencia actualizada con los ITS.

En concreto, se puede definir a los ITS como la fusión del desarrollo de la informática, información tecnológica y telecomunicaciones unidas al sector automotriz experto y de transporte de acuerdo con Paul, Chilamkurti, Daniel, & Rho (2017). La clave de las emergentes tecnologías de los ITS ha sido diseñada a partir de los principales desarrollos en estos sectores. Los ITS pueden entonces se definidos como la aplicación de tecnologías de informática, información y comunicaciones al manejo, en tiempo real, de vehículos y redes que involucran el movimiento de gente y bienes.

2.2.1 Usuarios de los ITS

El transporte y, así mismo, los ITS asociados a este, integran tres componentes:

- Infraestructura- por ejemplo, señales de tránsito, comunicaciones, computadoras, peajes, sensores, entre otros.
- Vehículos- tipos de vehículos, sus características de seguridad, su grado de uso avanzado de sistemas eléctricos y computarizados.
- Personas- comportamiento de humanos, preferencias y usos de modalidades de transporte, regulación y aplicación.

2.2.2 Servicios a los usuarios de ITS

Muchos de los usuarios de los servicios de los paquetes ITS son como los siguientes:

-Las gestiones en relación con el tráfico para reducir la demanda de desplazamientos motorizados y que dan prioridad a los buses, los vehículos no motorizados, y los peatones.

-Información de desplazamiento para ayudar a los viajeros para que tomen buenas decisiones sobre sus desplazamientos para su propia convivencia y la de los demás viajeros, y para ofrecer información más precisa sobre los horarios de llegada de los vehículos y fuentes de retraso mientras llevan a cabo su viaje.

-Gestión sobre vehículos comerciales para incrementar la eficiencia de carga y para reducir el impacto de los vehículos de carga de la comunidad

-Gestión sobre el transporte público en un sentido múltiple que asegure el cumplimiento de los horarios, para minimizar el impacto de la congestión de las operaciones y para asegurar el uso eficiente de personal y recursos

- El pago electrónico del transporte de peajes, incluyendo aplicaciones de cobro de congestión para mejorar la eficiencia, y la convivencia, y la seguridad incluyendo el manejo de emergencias.

-La seguridad incluyendo el manejo de emergencias.

Los sistemas para los nuevos vehículos se desarrollan dependiendo del mercado de las divisas de cada país y avances iniciales de ITS serán encontrados en nuevos automóviles de alta gama, camiones y buses. También están influenciados por las regulaciones gubernamentales que establecen estándares para el diseño de los vehículos que cubren tanto seguridad como emisiones.

Las tecnologías ITS emergentes tienen un papel importante para potenciar el desarrollo de nuevos usos de ITS, incluyen:

- Comunicaciones y multimedia personalizadas y portátiles; internet; estructura de comunicación de gran ancho de banda; y comunicación inalámbrica
- Otras tecnologías claves y emergentes incluyen:
- Sistemas de detectores y de sensores, así como de rastreo de vehículos

Estas tecnologías constituyen la manera de recolección y diseminación de la información en tiempo real de gente y vehículos, y su proximidad a atractores claves.

Los sistemas de detección y sensores son fundamentales en la construcción de bloques en la gestión avanzada del tráfico. Una gama de técnicas de detección es requerida para obtener un dibujo significativo de las redes de transporte, detección de embotellamiento vehicular, ocupación para aplicaciones de vehículos de alta ocupación, tipo de vehículos, entre otros. Los últimos detectores importantes y las tecnologías de sensores incluyen video, escáner, láser, radar de microondas e infrarrojo para la aplicación de túneles y en algunos vehículos para las comunicaciones a lo largo de las vías.

Las aplicaciones dispuestas para rastrear los vehículos a lo largo de las redes viales, usando tanto etiquetas de transporte, teléfonos celulares como lo más común, lectura de placas por medio de sistemas de reconocimiento de carácter

óptico en imágenes de video son otras tecnologías clave. El rastreo de vehículos ofrece la posibilidad de una completa detección del área sin el costo asociado con las tradicionales instalaciones de sensores.

2.2.3 Aplicación de ITS al control de tráfico en intersecciones.

De acuerdo con Zheng & Recker (2013), las señales de tráfico en una intersección señalizada operan en uno de dos modos diferentes de control: el primero hace referencia al pre-temporizado y el segundo al accionado por el tráfico (semi-actuado o totalmente actuado). Referente al pre-temporizado, todos los parámetros de control, incluido la longitud del ciclo, las divisiones de fases y su secuencia, están preconfiguradas fuera de la línea de función de un nivel de demanda determinista para cada momento en los diferentes periodos del día. Respecto al control accionado por el tráfico, la duración del ciclo, las divisiones de fase e incluso las secuencias de fase se pueden cambiar en respuesta al comportamiento vehicular en tiempo real registrado mediante detectores de bucle u otros sensores de tráfico, pero estos cambios todavía están sujetos a un conjunto de parámetros de controles fijos predefinidos que no están sensibles a la condición de tráfico variable. Referente a lo anterior, Teodorovic´ & Janic´ (2017) mencionan que los objetivos principales del control de tráfico adaptativo son la toma de decisiones acerca de la asignación, el desplazamiento, la longitud de fase y la secuencia de fase en verde según las condiciones del tráfico. Detectores en el pavimento proporcionan información básica del tráfico centrados a comunicar todo el tiempo. Los siguientes son algunos de los más importantes sistemas de control adaptativos:

SCATS (*Sydney coordinated adaptive traffic system*)

SCOOT (*split, cycle, offset optimization technique*)

ATSC (*automated traffic surveillance and control*)

OPAC (*optimized policies for adaptive control*)

RHODES (*real-time hierarchical optimized distributed effective system*)

RTACL (*real-time traffic adaptive control logic*)

De acuerdo con Roess, Prassas, & McShane (2004), existen tres tipos de controles actuados para semáforos que se mencionan a continuación:

1.-Control semi-actuado. Esta forma de control se refiere al caso donde una pequeña calle lateral se cruza con una arteria principal o colector. Este tipo de señales semi-accionadas son siempre de dos fases, con todos los giros realizados sobre una base permitida. Los detectores se colocan solo en las calles laterales. Además, el verde está en la calle principal todo el tiempo a menos que reciba una señal en la calle lateral. Por su parte, el número y duración de los verdes de la calle lateral están limitados por el tiempo de la señal y pueden ser restringidos a veces para que no interfieran con la progresión de los patrones de sincronización de señal a lo largo del colector arterial.

2.- Completo control actuado. Para esta forma de control, todos los carriles de todos los sentidos son monitoreados por detectores. La secuencia de las fases, asignaciones de verdes, y la duración del ciclo están todos sujetos a variación. Este tipo de controles efectiva en operaciones bifásicas y multifase, además, puede acomodar fases opcionales.

3.-Control volumen-densidad. Este es básicamente lo mismo que el completo control actuado con características adicionales que le permiten responder a la demanda.

2.3 Simulación de tráfico

El modelado de las maniobras de tráfico de carriles inducidas por incidentes sigue siendo un desafío en el campo de la teoría de flujo de tráfico y las áreas relacionadas como la simulación de tráfico en la gestión de accidentes (Hawas, 2007). Además, Sheu (2003) y Qi, Teng, & Martinelli (2009) concuerdan en sus

investigaciones que muchos de los problemas relacionados como los desbordamientos de cola y los bloqueos de carril resultan en dificultades en las operaciones de control y manejo del tráfico. Sheu & Ritchie (2001) por su parte compararon los casos sin incidentes y los incidentes debido al bloqueo de carril, y se dieron cuenta que el último puede dar lugar a aumentos anómalos en los cambios de carril aguas arriba del sitio del incidente, creando grandes colas y retrasos inusuales. Por lo anterior, realizar un modelado de puntos como las intersecciones se hace importante ya que se pueden evitar problemas de colas y congestión, esto es señalado en la investigación de Sheu (2011), en la que hace hincapié en que el modelado de las maniobras de tráfico de carriles inducidas por los accidentes es vital para desarrollar teorías de flujo de tráfico sofisticado, así como metodologías avanzadas de control y gestión del tráfico, todo esto para evitar congestiones de tráfico recurrentes.

2.3.1 Principios de la modelación del tráfico

Modelar el tráfico dinámico para simular su propagación temporal a través de las redes de tráfico depende de los objetivos. El flujo de tráfico puede ser modelado de manera macroscópica desde un punto de agregación basado en la analogía de la hidrodinámica teniendo en cuenta el tráfico como el paso de un fluido y es caracterizada por tener variables como: densidad, volumen y velocidad. Pero el tráfico también se puede modelar de manera microscópica, o sea, completamente disgregado desde el punto de vista que apunta a describir el proceso desde la dinámica de partículas (los vehículos) que la componen.

Referente al concepto de microsimulación, según Brackstone, Sykes, & Vortisch (2013), la función de este software especializado es construir un modelo computarizado de un sistema carretero y cargarlo con vehículos que representen la demanda en el sistema mencionado. En adición, menciona que dicho software permite al usuario ajustar las características de la red además de las demandas de tráfico para una representación más cercana a la realidad.

Enfocado al uso de software se pueden analizar distintos trabajos como es el caso de Vilarinho *et al.* (2014) en el que parte de la necesidad de desarrollar una estrategia para lograr resultados más eficientes en el aspecto del transporte, por ello toman en cuenta la microsimulación que es una herramienta sumamente poderosa para analizar y resolver problemas en el mundo real. Esta técnica simula las condiciones de la red de transporte haciendo análisis y pronósticos sobre la misma plataforma. Además, esta herramienta tiene la ventaja de que se puedan sacar conclusiones y probar nuevas técnicas sin la necesidad de estar directamente en el mundo real y alterar este sistema, y en adición a ello, permite obtener una recopilación de datos a partir del modelo de simulación lo que hace tan atractivo su empleo. Se han desarrollado cerca de 80 paquetes de *software* de acuerdo con Boxill & Yuan (2000), dichos paquetes han sido desarrollados por diferentes instituciones con la finalidad de realizar investigación, aunque estos paquetes de software tienen un objetivo en específico para el cual han sido desarrollados, como es el caso del análisis de intersecciones, la simulación en autopistas, entre otros. Con base a los investigadores mencionados previamente, la simulación de flujos de tránsito se puede dividir en tres grupos: i) la simulación macroscópica; que está basada en las analogías de la hidrodinámica y utiliza variables como densidad, volumen y velocidad, ii) la microscópica ; que describe el proceso desde el punto de vista dinámico de las partículas individuales que componen el flujo, y iii) la mesoscópica; que es una combinación de las anteriores con el fin de simplificar el sistema. Sin embargo, los sistemas mencionados tienen limitaciones debido a que son diseñados específicamente para un análisis en particular. Referente a los modelos de simulación, Chowdhury, Wolf, & Schreckenberg (1997) menciona que el modelado del comportamiento del tráfico microscópico ha ganado un mayor reconocimiento por su capacidad para reproducir con precisión las dinámicas del tráfico en los carriles inducidas por accidentes, particularmente el comportamiento en el cambio de carriles durante atascos de tráfico inducidos por incidentes. De acuerdo a la investigación realizada por Kerner & Klenov (2003), ellos propusieron modelos microscópicos ricos en parámetros para investigar el tráfico de manera

espacio-tiempo mediante patrones de congestión de cuellos de botella en autopistas, aunado a ello, discutieron los efectos de los cambios de carril en la estructura de los cuellos de botella en las autopistas y los atascos en movimiento.

Con relación a lo mencionado, algunos programas de simulación incluyen una interfaz para programar (API por sus siglas en inglés), tal es el caso de Aimsun, Vissim y Paramics que además permiten la interacción con otros programas (*third-party*). En el caso de Aimsun, se han utilizado modelos de micro-simulación de tráfico acoplados con modelos de emisión para estimar el impacto de las políticas de transporte en tiempo real y las estrategias de tráfico, tales modelos son los de Panis, Broekx, & Liu (2006) y Tate (2013).

Respecto a la validación y calibración de estos modelos, Antoniou *et al.* (2014) dan en su guía para simulación de tráfico una serie de pautas a revisar, recomendando la aplicación de una técnica de prueba de sensibilidad para identificar los parámetros del modelo más influyentes en función de la situación. Por su parte tanto Dowlin, Skabardonis, Halkias, McHale, & Zammit (2004), como Brackstone *et al.* (2013), hacen énfasis en tener en cuenta primero que los parámetros de la red global están calibrados y después los parámetros locales específicos del enlace para ajustar el resultado para un mejor ajuste de las condiciones de la red. Hollander & Liu (2008), con relación a la validación, mencionan que la validación del modelo calibrado confirma su poder predictivo y se lleva a cabo utilizando un nuevo conjunto de datos de entrada independientes.

En las investigaciones de Song, Yu, & Xu (2013) y Song, Yu, & Zhang (2012), hacen el señalamiento de que varios estudios de investigación recientes han demostrado que en general, dentro del tráfico agregado calibrado y validado, los modelos de microsimulación se comportan de manera adecuada, la investigación se basó en la información agregada de flujo y velocidad "estática" mientras se mantenía usando la representación del vehículo por defecto del modelo y los parámetros de comportamiento del conductor. Esto significa que estos modelos

microscópicos no estaban siendo calibrados y validados con base en los parámetros dinámicos del vehículo desglosados y que afectan a las emisiones; tales como la velocidad instantánea y la aceleración; simplemente asumieron que cada vehículo modelado individualmente pertenece a un grupo o grupos de vehículos que comparten las mismas características. Como conclusión a lo antes mencionado, Rakha & Crowther (2002) y Jie *et al.* (2013) señalan que incluso si el procedimiento de calibración y validación del modelo habitual es bueno para los resultados agregados, puede no ser preciso o adecuado para el rendimiento del modelo determinado por parámetros específicos, como la estimación emisiones del tráfico.

2.4 Algoritmos aplicados al control de tráfico

La palabra algoritmo se deriva de la traducción al latín de la palabra *Alkhô-warîzmi*, nombre de un matemático y astrónomo árabe que escribió un tratado sobre manipulación de números y ecuaciones en el siglo IX. Un algoritmo es un método para resolver un problema mediante una serie de pasos precisos, definidos y finitos.

Como lo menciona Daganzo (2007), cuando una vialidad está sobrecargada, incluso el menor incremento en el volumen de entrada que sea mayor a la cantidad crítica puede representar impactos significativos en las condiciones de tráfico y la destrucción del rendimiento de la red. Por lo anterior, si se controla la tasa de entrada de flujo se puede impedir la obstrucción de la red.

De acuerdo con Spall & Chin (1997), uno de los dispositivos de control más baratos son los semáforos. Con los avances recientes en comunicación, computadoras y tecnología de sensores, hay un interés creciente en desarrollar sistemas de control de semáforos optimizados, esto es mencionado por Litescu , Viswanathan, Aydt, & Knoll (2017) en su investigación. Por un lado, los nuevos desarrollos tecnológicos que responden en tiempo real se implementan en las principales ciudades, y por otro lado, los dispositivos de navegación o aplicaciones de teléfonos inteligentes se comunican y ayudan a los conductores en sus viajes, todo ello con la finalidad de optimizar los tiempos de recorrido de los usuarios.

En general, los semáforos tienen dos tipos de control: estático, con una duración de fase fija y dinámica o sensible al tráfico, optimizando la duración de la fase para priorizar instrucciones para grupos más grandes de automóviles como es mencionado por (Osorio & Bierlaire, 2008). Con respecto a lo mencionado, las investigaciones de Int Panis *et al.* (2006); Jie *et al.* (2013); Tate (2013), concuerdan que es fundamental garantizar que las dinámicas del vehículo en los modelos de micro-simulación de tráfico estén replicando la realidad, y que esto se logra mediante la calibración y validación mediante la metodología propuesta por ellos.

Enfocado a los sistemas de transporte inteligentes en los dispositivos de controles de tráfico en intersecciones, se han realizado múltiples investigaciones para la optimización de tiempos en dichos dispositivos como es el caso de Vilarinho *et al.* (2014), que en su trabajo propuso temporizar la señal mediante el método de Webster (Webster, 1958), para una señal de operación accionada. Mediante intervalos de cinco minutos, se proponía la duración para nuevos ciclos y el periodo de luz verde máximo para todas las etapas utilizando los movimientos de giro de los últimos cinco minutos en el nodo, con ello se logró que la intersección evitara estar saturada, sin embargo, quedaron pendientes el análisis de algunos factores como es el caso de la simulación para distintos tipos de geometrías y la revisión exhaustiva del algoritmo usado.

Teniendo en cuenta lo anterior, una sincronización de los sistemas semaforicos podría tener múltiples beneficios, “La sincronización de la señal actualizada aportaba beneficios en la calidad del aire, la seguridad de tráfico y reduce la frustración de los conductores” (Ratting *et al.*, 2002). Para el caso analizado por Zargari, Dehghani, & Mirzahosseini (2016), arrojó resultados en los que se mejoraba de un 14 a un 19 por ciento en la velocidad promedio de los usuarios mediante el algoritmo propuesto por ellos, relacionado a esto, los resultados obtenidos por ellos fueron que se controló la red a nivel crítico una vez que los volúmenes de tráfico aumentaban, mientras que cuando no se aplicaba el algoritmo se veían aumentados los tiempos en el flujo.

Radhakrishnan & Mathew (2011) proponen una metodología para desarrollar un modelo de saturación de flujo basado en unidades dinámicas de automóviles para análisis microscópico, el cual dio resultados buenos ya que los errores eran bajos y la calibración del modelo fue buena por lo que predecía el flujo de manera aceptable. He & Hou (2012) utilizaron el método de Colonia de Hormigas para resolver problemas de optimización de semáforos planteando sus estudios con base en la función de objetivos sintéticos como son las demoras, las paradas y la capacidad de la red, en ellos encontraron que este algoritmo es superior al Webster en muchos sentidos. Otro de los algoritmos usados para la optimización de semáforos son los algoritmos genéticos, que de acuerdo con Hrabovec & Hantuch (1997) mediante las pruebas que realizaron mostraron que este tipo de algoritmos en su mayoría encontró la mejor o la solución más cercana en funciones donde otro tipo de métodos funcionan de manera incorrecta.

Como se observa en la Tabla 2-1, el Método de Webster ofrece buenos resultados para la aplicación de algoritmos para el cálculo de ciclos semafóricos, sin embargo, el método de Colonia de Hormigas mostró mejores resultados para la optimización de dichos ciclos en aspectos importantes como son la disminución de las demoras, las paradas y el mantenimiento de la capacidad de la red. También se puede ver en la Tabla 2-1 que todos los modelos aplicados tuvieron que ser calibrados y validados para obtener resultados adecuados. Sin embargo, la calibración de este tipo de modelos no es sencilla, Hawas (2002) menciona que la validación de modelos microscópicos de simulación de tráfico incorpora algunas problemáticas debido a la insuficiencia y la rareza de los datos de validación para cada uno de ellos. Por su parte Madi (2016), hace referencia a que es de suma importancia que el modelo reproduzca la misma variabilidad del comportamiento del tráfico en el mundo real, por lo que aumenta la cuestión de calibración y validación de acuerdo con las características de comportamiento en la práctica.

Tabla 2-1 Comparativa de aplicación de algoritmos a semáforos.

Fuente: Elaboración propia

Autor	Objetivo	Descripción	Fortaleza	Debilidad
Vilarinho <i>et al.</i> (2014)	Evitar la saturación de la red	Uso del Método Webster	Uso de la micro-simulación evitando alterar el tráfico real	Falta revisión a detalle del algoritmo y falta de integración de algunos elementos geométricos
Zargari <i>et al.</i> (2011)	Mejorar la velocidad de la red congestionada	Estrategia de medición de tráfico interna y externa (IETMS por sus siglas en inglés)	Control de colas en la entrada de la subred	No considera cambios dinámicos en la selección de las rutas a lo largo de la solución del problema ni demandas variables
Radhakrishnan & Mathew (2011)	Desarrollar un modelo de saturación para tráfico altamente heterogéneo en intersecciones señalizadas	Método de optimización para análisis a nivel microscópico utilizando recuento de volúmenes clasificados	Buen modelo con errores bajos y predicciones cercanas a las reales debido a la buena calibración	Se propone analizarse en más partes del país de investigación en el que fue desarrollado. Los resultados dependen de la buena calibración del modelo

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se requería tener una base teórica que se refiere a una serie de antecedentes, todo ello con el fin de tener información actualizada del tema, esto es debido a que se debe tener una base sólida del tema para posteriormente aplicar la metodología más conveniente. Una vez realizado esto se requiere obtener datos de campo reales para hacer una correcta investigación además de una calibración y validación del modelo aplicado. La *Figura 3-1* muestra el desarrollo de la investigación.

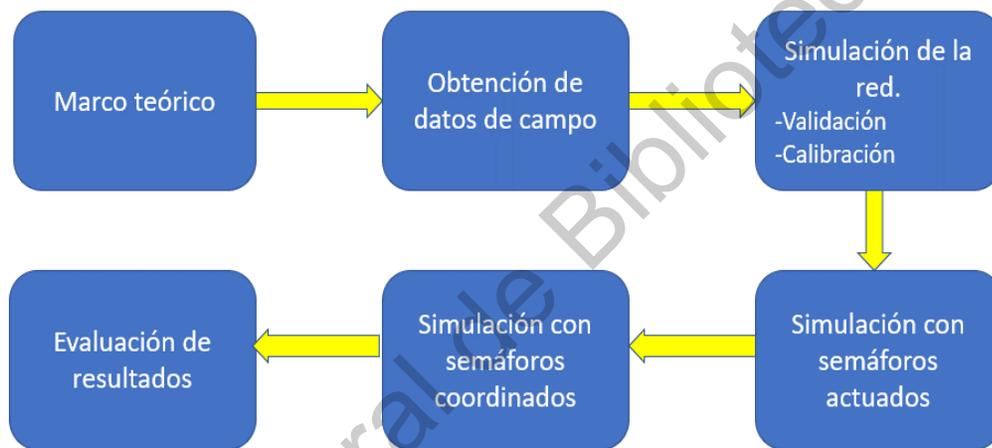


Figura 3-1. Esquema de desarrollo de Metodología

Fuente: Elaboración propia

3.1 Obtención de datos de campo

Se obtuvieron los datos necesarios para la correcta validación y calibración del escenario actual. Por lo anterior, se realizaron los estudios de tránsito de la intersección teniendo en cuenta la hora del día, los intervalos de tiempo, así como la clasificación de los vehículos. Como resultado se determinó que la hora de máxima demanda o pico está entre las 7:30 a.m. y 8:30 a.m. de acuerdo con el aforo vehicular realizado. También se realizó el estudio correspondiente de la obtención de los datos del transporte público, estos datos fueron la hora de llegada y salida de cada una de las rutas, los tiempos de ascenso y descenso, así como la velocidad y

características de los vehículos de transporte público y particulares que transitan por el eje vial.

Se tomaron los tiempos actuales de fase de los semáforos mediante el uso de un cronómetro para posteriormente ingresarlos al simulador de tráfico, estos tiempos fueron calibrados a través de grabaciones que se realizaron durante la hora de máxima demanda para su correcta simulación.

Para el caso de las velocidades se hizo uso de pistola de radar, teniendo en cuenta que para cada movimiento se tomaron más de 30 registros con la finalidad de que se apeguen los datos a una distribución normal.

En la Figura 3-2 se muestra la figura de las intersecciones analizadas en esta investigación las cuales corresponden a las siguientes avenidas: Tecnológico, que tiene un flujo de norte a sur; Igancio Pérez, que tiene un flujo de norte a sur; Ezequiel Montes, la cual tiene un flujo de norte a sur; Fray Pedro de Gante, la cual su flujo es de sur a norte; Corregidora y Luis Pasteur, ambas con flujos en sentidos tanto de norte a sur como de sur a norte; todas ellas intersectan la avenida Constituyentes. El eje principal que corresponde a avenida Constituyentes tiene 3 carriles por sentido, los cuales miden 3.5m cada uno, además, cuenta en el área central un carril exclusivo para el transporte público. Además, se registraron cada uno de los movimientos que permite cada fase en cada intersección.

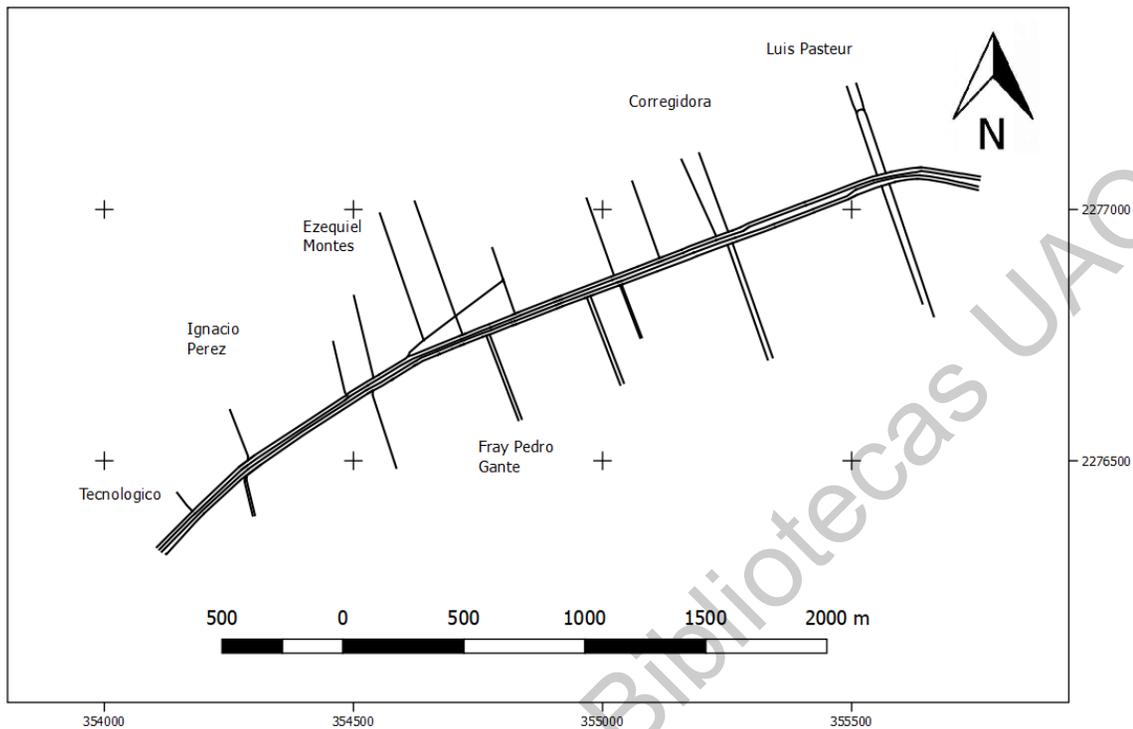


Figura 3-2. Eje vial de estudio

Fuente: elaboración propia

3.2 Simulación de la Red

Se realizó la programación a través del programa Aimsun de microsimulación. AIMSUN que es un simulador microscópico interactivo avanzado. Dicho simulador de tráfico puede simular el comportamiento individual de los vehículos en la red en el tiempo usando varias teorías de comportamiento de vehículos. Este programa contiene una interfaz de programación de aplicaciones API (por sus siglas en inglés *Application Programming Interface*) mediante la cual se puede hacer el acoplamiento de algoritmos desarrollados externamente.

Se simularon cuatro escenarios: el primero corresponde a la red calibrada y validada con las características actuales, el segundo se desarrolló con semáforos actuados libres, el tercero mediante conteos usando coordinación de semáforos y el cuarto usó parámetros parecidos al tercero, pero con una configuración enfocada a la prioridad en el transporte público. Todos los escenarios se desarrollaron a partir

del primer escenario de condiciones actuales, de ahí la importancia de que la red esté bien calibrada y validada para este escenario.

Para el primer escenario se ingresaron los siguientes parámetros obtenidos de campo señalados en la sección anterior 3.1 Obtención de datos de campo.

La simulación permite realizar pruebas en el desarrollo de sistemas experimentales que posteriormente pueden ser empelados en el sistema físico. Dicha simulación se realiza a través de la representación de un modelo físico en un computador proporcionando resultados que sirven de apoyo para la toma de decisiones. De acuerdo con Pidd (1992), la simulación puede observarse como un experimento de muestreo en el sistema real a través de un modelo.

En la *Figura 3-3* se puede observar el diagrama de flujo del proceso de simulación que generalmente consiste en los siguientes pasos:

1. Formulación del problema y plan de estudio: se identifica la naturaleza del problema y los requerimientos para encontrar la solución.
2. colección de datos y formulación del modelo: se adquiere evidencia empírica sobre el comportamiento para generar una hipótesis y traducirlo en términos de una representación formal para constituir el modelo del sistema.
3. Revisar si el modelo construido es una representación valida del sistema de estudio propuesto.
4. Traducir formalmente el modelo en términos del programa computacional.
5. y 6. Revisar que el modelo computacional se comporta correctamente, si hay errores se corrigen para quedar libre de errores y proveer resultados aceptables.
7. identificar los factores de diseño que traduzcan las preguntas “qué pasa sí” en términos de los experimentos computacionales.

8. y 9. Conducir el experimento de la simulación en la computadora y analizar la salida de datos.

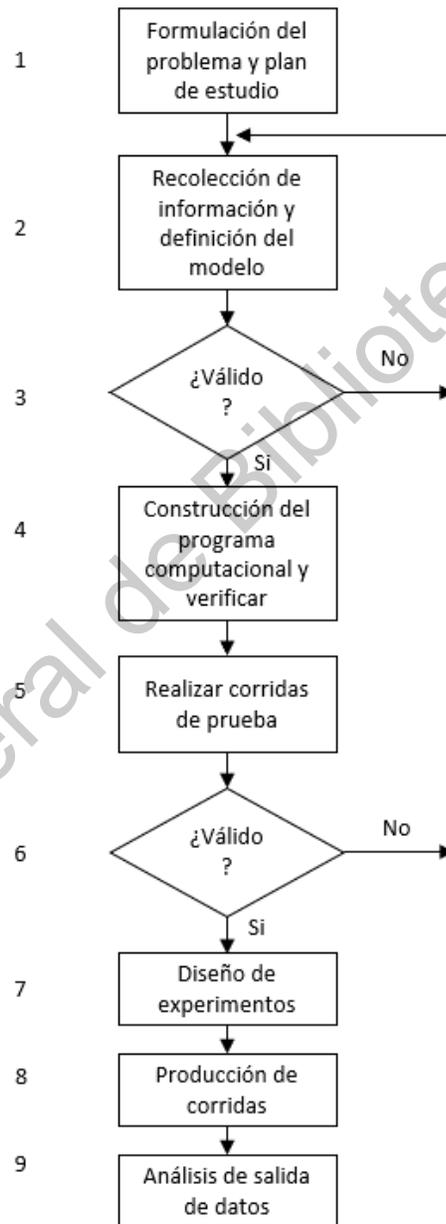


Figura 3-3. Pasos en la simulación de estudio

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Validación y calibración

El proceso de calibración permite construir un modelo de simulación creíble. De acuerdo con Law & Kelton (1991) señalan los siguientes puntos:

Por un lado, la verificación consiste en determinar que el programa de simulación se comporta como se planteó en un principio. Por lo tanto, la verificación revisa la traslación del modelo conceptual de simulación al correcto funcionamiento del programa.

Por otro lado, la validación es relacionada con la determinación de si el modelo conceptual de simulación es una fiel representación del sistema de estudio. Si el modelo es válido, entonces las decisiones tomadas con el modelo serán similares a esas decisiones hechas físicamente experimentadas en el sistema.

Un modelo es creíble cuando sus resultados son aceptados por el usuario, y son usados orientados a la toma de decisiones.

Calibración

En el caso de un modelo de simulación de tráfico en Aimsun, el comportamiento del modelo depende de una amplia variedad de parámetros del modelo. En resumen, si se considera que el modelo está compuesto por entidades (es decir, vehículos, secciones, cruces, intersecciones, etc.), cada uno de ellos se describe mediante un conjunto de atributos (es decir, parámetros del seguimiento del automóvil, el carril cambio, aceptación de espacio, límites de velocidad y aceptación de velocidad en secciones, etc.), el comportamiento del modelo está determinado por los valores numéricos de estos parámetros. Por lo tanto, el proceso de calibración tendrá el objetivo de encontrar los valores de estos parámetros que producirán un modelo válido.

Algunos ejemplos pueden ayudar a ilustrar esta dependencia entre los valores de los parámetros y el comportamiento del modelo. Las longitudes de los vehículos tienen una clara influencia en los flujos: a medida que aumentan las longitudes de los vehículos, los flujos disminuyen y las longitudes de la cola aumentan. En el modelo de seguimiento de automóviles Aimsun, la velocidad objetivo, el límite de velocidad de la

sección y la aceptación de velocidad, entre otros, definen la velocidad deseada para cada vehículo en cada sección. Cuanto mayor sea la velocidad objetivo, mayor será la velocidad deseada para cualquier sección dada, lo que resulta en un aumento en el flujo de acuerdo con las relaciones de velocidad de flujo. De esta manera, como parte del proceso de calibración, se debe establecer para un modelo particular la influencia de los parámetros de aceleración y frenado en la capacidad de las secciones, es decir, para las secciones de tejido. Del mismo modo, los efectos de las longitudes de las Zonas 1 y 2 en el modelo de cambio de carril influyen en la capacidad de las secciones de tejido, mientras que el porcentaje de adelantamiento y el porcentaje de recuperación influyen en la distribución del carril, y así sucesivamente.

Métodos Estadísticos para la Validación de Modelos

Para la validación los datos medidos en el sistema real deben de dividirse en dos conjuntos de datos: el conjunto de datos que se utilizará para desarrollar y calibrar el modelo, y un conjunto de datos separado que se utilizará para la prueba de validación.

En cada paso del proceso de validación iterativa, se realizará un experimento de simulación. Cada uno de estos experimentos de simulación será definido por la entrada de datos al modelo de simulación y el conjunto de valores de los parámetros del modelo que identifican el experimento. La salida del experimento de simulación será un conjunto de valores simulados de las variables de interés, en el caso del primer escenario, los flujos medidos en cada detector de tráfico en la red de carreteras en cada intervalo de muestreo. Por ejemplo, suponiendo que en la definición del experimento de simulación el intervalo de muestreo es de cinco minutos, es decir, las estadísticas del modelo se recopilan cada cinco minutos y que la variable de muestreo es el flujo simulado w , se caracterizará la salida del modelo de simulación por el conjunto de valores w_{ij} , del flujo simulado en el detector i en el tiempo j , donde el índice i identifica el detector ($i = 1, 2, \dots, n$, siendo n el número de detectores), e indexa el intervalo de muestreo ($j = 1, 2, \dots, m$, m es el número de intervalos de muestreo en el horizonte de simulación T). Si v_{ij} son las medidas de modelo reales correspondientes para el detector i en el intervalo de muestreo j , una técnica estadística típica para validar el modelo sería

comparar ambas series de observaciones para determinar si están lo suficientemente cerca. Para el detector i , la comparación podría basarse en probar si la diferencia.

$$d_i = w_{ij} - v_{ij}, j=1, \dots, m \quad (1)$$

dónde \bar{d}_i significativamente diferente de cero o no. Esto se puede determinar utilizando t- estadística:

$$\bar{t}_{m-1} = \frac{\bar{d}_i - \delta_i}{\bar{s}_d / \sqrt{m}} \quad (2)$$

dónde δ_i es el valor esperado de \bar{d}_i y \bar{s}_d la desviación estándar de \bar{d}_i , para la prueba de hipótesis nula:

$$H_0: \delta_i = 0 (|\bar{t}_{m-1}| > t_{m-1}^{\alpha/2}) \quad (3)$$

Si para $\delta_i = 0$ el valor calculado de \bar{t}_{m-1} de la distribución t de Student es significativo para la significancia específica del nivel α entonces se concluye que el modelo no está reproducido cercano a la realidad y se tiene que rechazar el modelo.

Si $\delta_i = 0$ y no es significativo \bar{t}_{m-1} entonces se concluye que la simulación y la realidad son prácticamente la misma y la simulación es suficientemente válida.

El proceso se repite para cada uno de los detectores. El modelo es aceptado cuando todos los detectores pasan la prueba.

Respecto al método estadístico existen algunas consideraciones especiales a tomar en cuenta de acuerdo con Kleijnen (1995), que se enumeran a continuación.

1. El procedimiento estadístico supone observaciones distribuidas de forma idéntica e independiente (i.i.d), mientras que las medidas reales del sistema y la salida simulada correspondiente para una serie de tiempo pueden no seguir este supuesto. Por lo tanto, sería deseable que al menos las m parejas (correlacionadas) $d_i = w_{ij} - v_{ij}, j = 1, \dots, m$ sean i.i.d. Esto se puede lograr cuando w_{ij} y v_{ij} son valores promedio de experimentos replicados independientemente.

2. Cuanto más grande es la muestra, menor es el valor crítico $t_{m-1}^{\alpha/2}$, y esto implica que un modelo de simulación tiene una mayor probabilidad de ser rechazado a medida que la muestra crece. Por lo tanto, las estadísticas t pueden ser significativas y sin embargo importantes si la muestra es muy grande, y el modelo de simulación puede ser lo suficientemente bueno para fines prácticos.

Estas consideraciones llevan a recomendar a no confiar en un solo tipo de prueba estadística para validar el modelo de simulación. Una prueba alternativa es verificar si w y v están positivamente correlacionados, es decir, probar la importancia de la hipótesis nula:

$$H_0 : \rho > 0 \quad (\rho \text{ coeficiente de correlación lineal}) \quad (4)$$

Esto representa una prueba de validación menos estricta que acepta que las respuestas reales simuladas no necesariamente tienen la misma media y que lo significativo es si están correlacionadas positivamente o no. La prueba se puede implementar utilizando la técnica de mínimos cuadrados ordinarios para estimar el modelo de regresión:

$$E(v|w) = \beta_0 + \beta_1 w + \varepsilon \quad (\varepsilon \text{ término de error aleatorio}) \quad (5)$$

La prueba se refiere a la hipótesis unilateral $H_0 : \beta_1 \leq 0$. La hipótesis nula se rechaza y el modelo de simulación se acepta si hay pruebas sólidas de que las respuestas simuladas y reales están positivamente correlacionadas. El análisis de varianza del modelo de regresión es la forma habitual de implementar esta prueba. Esta prueba puede fortalecerse, llegando a ser equivalente a la primera prueba si esta hipótesis se reemplaza por la hipótesis compuesta $H_0 : \beta_0 = 0$ y $\beta_1 = 1$, lo que implica que las medias de las mediciones reales y las respuestas simuladas son idénticas y cuando en la medición del sistema excede su media, entonces la observación simulada también excede su media.

Una tercera familia de pruebas estadísticas para la validación del modelo de simulación se basa en la observación anterior de que las series medidas y

simuladas, v_{ij} y w_{ij} , respectivamente, son series de tiempo. En este caso, la serie medida podría interpretarse como la original y la serie simulada la "predicción" de la serie observada. En ese caso, la calidad del modelo de simulación podría establecerse en términos de la calidad de la predicción, y eso significaría recurrir a técnicas de pronóstico de series de tiempo para ese propósito. Si se considera que lo que se observa como salida del sistema, así como la salida del modelo que representa el sistema, depende de dos tipos de componentes: las relaciones funcionales que gobiernan el sistema (el patrón) y la aleatoriedad (el error), y que los datos medidos y observados están relacionados con estos componentes por la relación:

$$\text{Datos} = \text{patrón} + \text{error}$$

Esto significa que la tarea crítica en el pronóstico puede interpretarse en términos de separar el patrón del componente de error para que el primero pueda usarse para el pronóstico. El procedimiento general para estimar el patrón de una relación consiste en ajustar alguna forma funcional de manera que se minimice el componente de error.

Una forma de lograrlo podría ser a través del análisis de regresión como en la prueba anterior.

Si para el detector i el error de la j -ésima "predicción" es $d_i = w_{ij} - v_{ij}$, $j = 1, \dots, m$, entonces una forma típica de estimar el error de las predicciones para el detector i es "error cuadrático medio", rms_i (Root Mean Square Error por sus siglas en inglés) definido por:

$$rms_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (W_{ij} - V_{ij})^2} \quad (6)$$

Esta estimación de error es quizás la más utilizada en la simulación de tráfico, y aunque obviamente cuanto más pequeño es el mejor rms_i , mejor es el modelo,

tiene un inconveniente bastante significativo, en la medida en que cuadra el error, enfatizando así los errores grandes.

Modelo de Validación Estadística en Objetos dentro de Aimsun

Después de haber ejecutado la simulación dinámica, se ha calculado el promedio de simulaciones, el editor de replicación, el editor de resultados o el editor promedio tendrán datos en su carpeta de validación.

El objetivo de la carpeta de Validación es poder comparar datos reales con datos simulados. Para hacerlo, primero, se debe definir un conjunto de datos real a nivel de escenario. Una vez que se define el conjunto de datos reales y los datos simulados están disponibles, la carpeta de Validación se verá como la de la *Figura 3-4*. La Serie de tiempo de lectura de conjunto de datos y la Serie de tiempo simulada se seleccionan en el menú desplegable y se muestran de 3 maneras:

- Como gráfico, ejemplificado en la *Figura 3-4*.
- Como una regresión, ejemplificada en la *Figura 3-5*.
- Como una tabla, ejemplificada en la *Figura 3-6*.

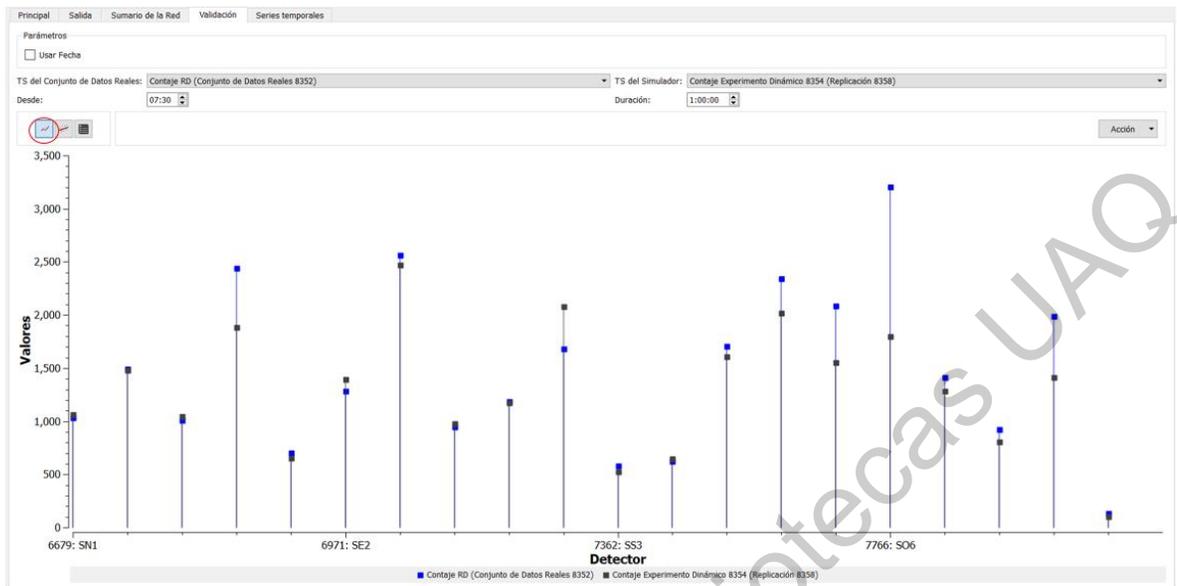


Figura 3-4. Comparativa gráfica de datos reales con simulados mediante detectores

Fuente: Elaboración propia

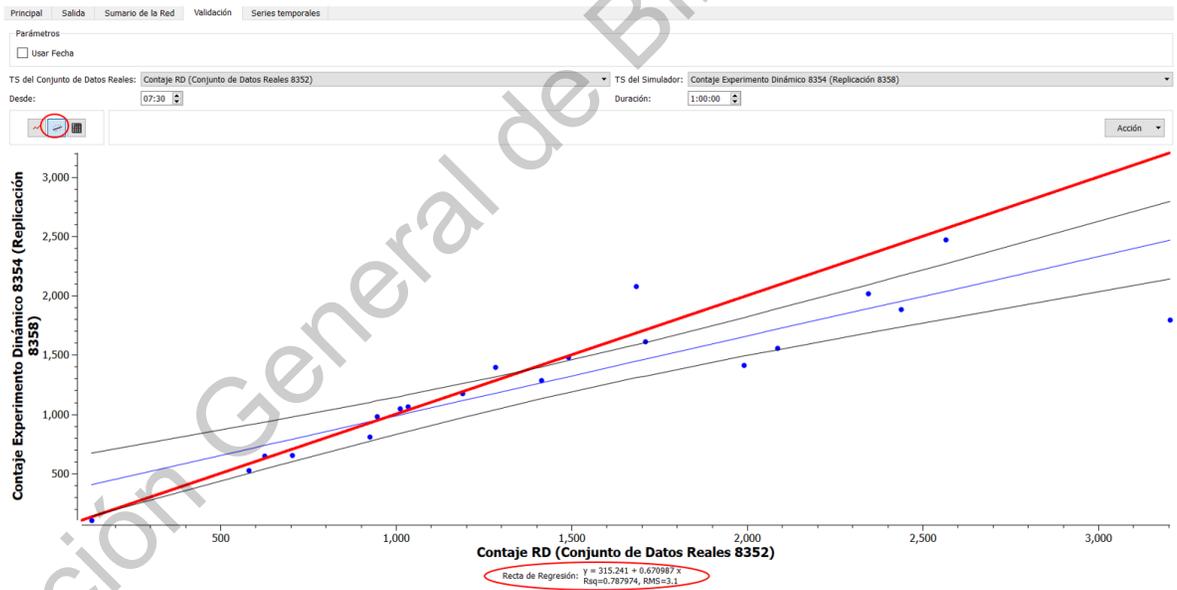


Figura 3-5. Estadística para el modelo de validación- Vista de Regresión

Fuente: Elaboración propia

Principal Salida Sumario de la Red Validación Series temporales

Parámetros
 Usar Fecha

TS del Conjunto de Datos Reales: Contaje RD (Conjunto de Datos Reales 8352) TS del Simulador: Contaje Experimento Dinámico 8354 (Replicación 8358)

Desde: 07:30 Duración: 1:00:00



	Objeto	Contaje RD (Conjunto de Datos Reales 8352)	Contaje Experimento Dinámico 8354 (Replicación 8358)	Diferencia Absoluta	Diferencia Relativa (%)
6679: SN1	6679: SN1	1033	1063	30	2.90416
6680: SE1 (SE1)	6680: SE1 (SE1)	1491	1479	-12	-0.804829
6681: SS1	6681: SS1	1011	1047	36	3.56083
6682: SO1	6682: SO1	2439	1887	-552	-22.6322
6970: SN2	6970: SN2	704	654	-50	-7.10227
6971: SE2	6971: SE2	1283	1397	114	8.88542
6972: SO2	6972: SO2	2565	2470	-95	-3.7037
6973: SS2	6973: SS2	946	979	33	3.48837
7360: SE3	7360: SE3	1189	1176	-13	-1.09336
7361: SO3	7361: SO3	1684	2078	394	23.3967
7362: SS3	7362: SS3	580	529	-51	-8.7931
7398: SN4	7398: SN4	625	647	22	3.52
7399: SE4	7399: SE4	1710	1611	-99	-5.78947
7400: SO4	7400: SO4	2344	2018	-326	-13.9078
7765: SE6	7765: SE6	2087	1557	-530	-25.3953
7766: SO6	7766: SO6	3204	1796	-1408	-43.9451
7811: SE5	7811: SE5	1413	1287	-126	-8.9172
7812: SN5	7812: SN5	925	807	-118	-12.7568
7813: SO5	7813: SO5	1990	1416	-574	-28.8442
7814: SS5	7814: SS5	134	105	-29	-21.6418
Media	Media	1467.85	1300.15	-167.7	-11.4249

Figura 3-6. Estadística para el modelo de validación- Vista de Tabla

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan cada una de las 3 formas.

Para mostrar los datos del conjunto de datos reales frente a los datos simulados como un gráfico se debe hacer clic en la elipse roja en la Figura 3-4.

Para mostrar una regresión de los datos del conjunto de datos reales frente a los datos simulados, se debe hacer clic en la elipse roja de la Figura 3-5, a continuación, se mostrará la información sobre la línea de regresión, Rsq y RMS .

La tercera opción es mostrar los datos del conjunto de datos reales en comparación con los datos de simulación en una vista de tabla como se muestra en la Figura 3-6. Aimsun calcula automáticamente la diferencia absoluta y la diferencia relativa de cada par de valores y colorea las celdas de los distintos en función de Su valor es dar una impresión visual y más rápida de dónde están las principales desviaciones.

La estadística GEH es otra estadística utilizada en la ingeniería de tráfico para comparar dos conjuntos de datos de tráfico, en general, dos conjuntos de volúmenes de tráfico. Aunque su forma matemática es similar a una prueba de chi cuadrada, no es una verdadera prueba estadística. Es una fórmula empírica que ha demostrado ser bastante útil. Se define como:

$$GEH = \sqrt{\frac{2(w-v)^2}{w+v}} \quad (7)$$

donde w y v son los flujos simulados y observados respectivamente. Los límites de GEH se definen utilizando los siguientes rangos:

- 0 – 5 Buen ajuste.
- 5 -10 Requiere más investigación.
- > 10 Inaceptables.

3.2.2 Modelos ambientales

Los resultados de las emisiones contaminantes se basan en el modelo ambiental QUARTET (1992) de emisiones y el modelo desarrollado por Int Panis, Broekx, & Liu (2006) sobre emisiones del tráfico instantaneas y la influencia de los límites de velocidad.

Respecto al modelo de emisiones de contaminación QUARTET, este modelo está dentro de Aimsun, este modelo permite introducir diferentes tipos de contaminantes para el desarrollo de la simulación. Para esta investigación los datos usados fueron los datos de óxidos de nitrógeno.

Únicamente se hizo el análisis para coches debido a que el aforo vehicular arrojó muy pocos vehículos pesados y el transporte público de la zona usa gas natural.

Se ingresaron los siguientes datos de contaminante para los automóviles (NO_x);

- 1.- Nombre del contaminante
- 2.- Tasa de emisión para la aceleración de los vehículos en g/s (parámetro ARE en el editor)
- 3.- Tasa de emisión para la desaceleración de los vehículos en g/s (parámetro DER en el editor)
- 4.- Tasa de emisión para vehículos de ralenti en g/s (parámetro IER en el editor)

Respecto al modelo de Int Panis *et al.* (2006), este modelo está enfocado a modelar las emisiones contaminantes instantaneas causadas por la aceleración / desaceleración y velocidad para todos los vehículos. este modelo considera que la velocidad es un factor importante en las emisiones inducidas por el tráfico, en especial las causadas por aceleración y desaceleración. La obtencion de la emisiones contaminantes producidas se basa en los estados antes mencionados, una emision instantánea está relacionada con una velocidad instantánea y la aceleración del vehículo y despues es integrado con un modelo de simulación microscópico.

Los contaminantes analizados en esta investigación fueron el dióxido de carbono (CO2) y los óxidos de nitrógeno (NOx) porque eran los datos con los que se podía hacer un análisis ya que para otros contaminantes se requieren mas datos y no es el foco central de esta investigacion. Los contaminates que se pueden analizar mediante este modelo son: Dióxido de Carbono (CO2), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas importantes (PM). En adición, la investigación de Int Panis *et al.* (2006) arrojó una ecuacion general de regresión múltiple no lineal a partir de los datos de emision de contaminantes basdos en la velocidad y aceleración, obteniendo así todas las emisiones contamiennates como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E_n(t) = \max [E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)] \quad (8)$$

Dónde:

$v_n(t)a_n(t)$ son la velocidad instantánea y aceleración del vehículo n en el tiempo t .

E_0 es un límite inferior de emisiones (g/s) especificada para cada vehículo y contaminante.

f_1 a f_6 son emisiones constantes específicas para cada vehículo y el tipo de contaminantes es determinado por el análisis de regresión.

Escenario con Semáforos Actuados

Para el desarrollo de este escenario se tomó como base la red validada y calibrada del escenario actual. El escenario fue implementado a través de los parámetros de señales de tráfico accionadas. Para simular se utilizaron las siguientes características principales de los semáforos activados: tiempo verde mínimo, extensión de unidad o vehículo y tiempo verde máximo. Además, en este escenario se utilizaron múltiples sensores para medir la presencia del vehículo. La función de los sensores fue extender el tiempo verde para dejar pasar los vehículos dependiendo de la demanda. Por un lado, el tiempo verde máximo es el tiempo verde máximo para cada fase de la señal de tráfico, dependiendo de la presencia del vehículo. Por otro lado, el tiempo verde mínimo es el tiempo verde mínimo para cada fase de señal de tráfico, en el caso de que los sensores no detecten presencia se hace uso del verde máximo. Además, el transporte público tiene su propio sensor dedicado en su línea exclusiva. Para este escenario no se modificaron la secuencia de fases y el desplazamiento aplicado para cada una de las señales de tráfico de intersección se asignaron como en el escenario real, pero en modo libre, es decir, que cada intersección es independiente.

Para cada fase activada, se deben establecer las siguientes características básicas en el controlador:

1. Tiempo verde mínimo, $G_{mín}$. Cada fase activada tiene un tiempo verde mínimo, que sirve como la menor cantidad de tiempo verde que puede asignarse a una fase cuando se inicia.

2. Unidad o extensión del vehículo, U . Esta vez en realidad tiene tres propósitos diferentes:

-Representa el espacio máximo entre accionamientos en un solo detector requerido para retener el verde.

-Es la cantidad de tiempo agregada a la fase verde cuando se recibe una actuación adicional dentro de la extensión de la unidad, U .

-Debe ser de longitud suficiente para permitir que un vehículo viaje desde el detector a la línea de PARADA.

3. Tiempo verde máximo, $G_{máx}$. Cada fase tiene un tiempo verde máximo que limita la duración de una fase verde, incluso si hay actuaciones continuas que normalmente retendrían el verde. El "tiempo verde máximo" comienza cuando hay una "llamada" (o activación del detector) en una fase competitiva.

Tiempos verdes mínimos

Deben establecerse tiempos verdes mínimos para cada fase en una señalización activada, incluida la fase no activada de un controlador semi-activado. El tiempo verde mínimo en una fase accionada se basa en el tipo y la ubicación de los detectores.

Detectores de punto o paso

Los detectores puntuales solo proporcionan una indicación de que se ha recibido una "llamada" en la fase del sujeto. El número de llamadas experimentadas y / o atendidas no se retiene. Por lo tanto, si un detector de puntos se encuentra a d pies de la línea de PARADA, se debe suponer que una cola de vehículos ocupa

completamente la distancia d . El tiempo verde mínimo, por lo tanto, debe ser lo suficientemente largo como para despejar una cola de vehículos que ocupan completamente la distancia d , o:

$$G_{min} = l_1 + 2 * Int\left(\frac{d}{20}\right) \quad (9)$$

dónde

G_{min} = tiempo verde mínimo (s)

l_1 = tiempo perdido de inicio, (s)

d = distancia entre el detector y la línea de PARADA (ft)

La función entera requiere que el valor de $d / 20$ se redondee al siguiente valor entero más alto. En esencia, requiere que un vehículo montado en el detector reciba servicio dentro del período verde mínimo. Varias agencias establecerán el valor de cuatro, según la política local. Los valores entre 2.0 y 4.0 s se usan con mayor frecuencia.

Detectores de área o presencia

Cuando se usan detectores de área, el tiempo verde mínimo puede ser variable, en función del número de vehículos detectados en la cola cuando se inicia el verde. En general:

$$G_{min} = l_1 + 2n \quad (10)$$

Dónde

l_1 = tiempo perdido de inicio, (s)

n = número de vehículos almacenados en el área de detección, (veh)

Unidad o extensión del vehículo

Como se señaló anteriormente, la unidad o extensión del vehículo tiene tres propósitos diferentes. En términos de operación de la señal, sirve como el espacio mínimo permitido para retener una señal verde y como la cantidad de tiempo verde agregado cuando se detecta una actuación adicional dentro del espacio mínimo permitido.

La extensión de la unidad se selecciona con dos criterios en mente:

- La extensión de la unidad debe ser lo suficientemente larga como para que un vehículo posterior que opere en tráfico denso en un camino seguro pueda retener una señal verde (suponiendo que aún no se haya alcanzado el máximo verde).

- La extensión de la unidad no debe ser tan larga que los vehículos estrangulados puedan retener el verde o que se agregue un tiempo excesivo al verde.

Estos criterios producen un rango bastante estrecho de valores factibles. Debe recordarse que incluso en condiciones ideales, los niveles de saturación están en el rango de 1.8 a 2.0 s. Por lo tanto, no sería práctico reducir la extensión de la unidad por debajo de estos o incluso a estos valores. Dado que la intención de una señal activada es maximizar el uso eficiente del tiempo verde disponible, es ilógico permitir huecos de más de 4.0 a 5.0 s para dar como resultado una extensión de verde cuando hay llamadas en fases competidoras.

Sin embargo, para todos los tipos de controladores, la extensión de la unidad debe ser igual o mayor que el tiempo de paso.

El tiempo de paso es el tiempo que le toma a un vehículo atravesar la distancia desde el detector hasta la línea de PARADA, o:

$$U \geq P = \frac{d}{1.47 S_{15}} \quad (11)$$

dónde

U = extensión de la unidad, (s)

P = tiempo de paso, (s)

d = distancia del detector a la línea STOP, (pies)

S_{15} = velocidad de aproximación del percentil 15, (mi / h)

Tiempos verdes máximos y el ciclo crítico

El "ciclo crítico" para una señal activada completa es uno en el que cada fase alcanza su tiempo verde máximo. Para señales semi-activadas, el "ciclo crítico" involucra el tiempo verde máximo para la calle lateral y el tiempo verde mínimo para la calle principal, que no tiene detectores. Los tiempos verdes máximos para las fases activadas y / o el tiempo verde mínimo para la calle principal con señalización semiactuada se determinan determinando la duración del ciclo y la división verde inicial en función de las demandas promedio durante el período de análisis máximo. El método es el mismo que el utilizado para determinación de la duración de los ciclos y los tiempos verdes para una señal programada previamente:

$$C_i = \frac{L}{1 - \left(\frac{V_c}{1.615 * PHF * \left(\frac{v}{c} \right)} \right)} \quad (12)$$

dónde

C_i = duración del ciclo inicial, (s)

V_c = suma de los volúmenes críticos del carril (veh / h)

v / c = relación v / c deseada a alcanzar

PHF = factor de hora pico

Debido a que el objetivo en la señalización activada es tener poco tiempo verde sin usar durante los períodos pico, la relación v / c elegida en esta determinación se considera 0.95 o más en la mayoría de las aplicaciones.

Conociendo la duración del ciclo, los tiempos verdes se determinan como:

$$g_i = (C - L) * \left(\frac{V_{ci}}{V_c}\right) \quad (13)$$

dónde

g_i = tiempo verde efectivo para la Fase i , (s)

V_{ci} = volumen de carril crítico para la Fase i , (vehículo)

Todas las demás variables son como se definieron previamente

Estos cálculos dan como resultado una duración del ciclo y tiempos verdes que acomodarían las demandas promedio del ciclo en los 15 minutos pico de la hora de análisis. Sin embargo, no son suficientes para manejar las perturbaciones que ocurren durante el período de demanda pico de 15 minutos cuando las demandas de cada ciclo exceden la capacidad del ciclo. Por lo tanto, para proporcionar suficiente flexibilidad en el controlador para atender adecuadamente las demandas pico ciclo por ciclo durante el período de análisis, los tiempos verdes determinados a partir de la ecuación (13) se multiplican por un factor de entre 1.25 y 1.50. Los resultados se convertirían en los tiempos verdes máximos para cada fase y / o el tiempo verde mínimo para una calle principal en una señal semi-activada.

La "duración crítica del ciclo" es igual a la suma de los tiempos verdes máximos reales (y / o el tiempo verde mínimo para una calle principal en una ubicación semi-activada) más transiciones amarillas y completamente rojas.

$$C_c = \sum_i (G_i + Y_i) \quad (14)$$

dónde

C_c = longitud crítica del ciclo, (s)

G_i = tiempo verde máximo real para la Fase i activada, o tiempo verde mínimo real para la calle principal en una señal semi-activada, (s)

Y_i = suma de los intervalos amarillo y rojo para la Fase i . (s)

El tiempo de una señal activada implica una serie de consideraciones prácticas que pueden anular los resultados de los cálculos como se describe. Particularmente en una ubicación de señal semi-activada con bajas demandas en la calle lateral, el máximo verde, $G_{máx}$, puede calcular a un valor que es menor que el mínimo verde, $G_{mín}$. Aunque es una ocurrencia más rara, esto podría suceder en una fase dada en una ubicación activada también, particularmente donde están involucradas fases protegidas de giro a la izquierda. En tales casos, el $G_{máx}$ se establece como $G_{mín} + nU$, donde n es el número máximo de vehículos que se atenderán durante una sola fase verde. El valor de n generalmente se establece aproximadamente como 1.5 veces el número promedio de vehículos esperados por ciclo (un concepto iterativo, ya que la duración del ciclo sería necesaria para determinar el valor de n). Sin embargo, para mantener un equilibrio apropiado entre todas las fases, los valores de $G_{máx}$ para otras fases deben ajustarse para mantener una relación igual al equilibrio de los volúmenes de carril crítico para cada fase.

3.3 Escenario con Semáforos coordinados

El tercer escenario se desarrolló a través de conteos por sensores ubicados en las áreas de máxima demanda en el eje, a través de los conteos el algoritmo calcula el tiempo por cada fase. El recuento se multiplica por un factor para calcular el tiempo. Aunque el tiempo para la fase se calcula por recuentos, cada fase tiene un mínimo y un máximo verdes. En cuanto al transporte público, este tiene un tiempo constante en este escenario. En este escenario, el desplazamiento se determinó para cada señal de tráfico de intersección dependiendo de la distancia y se

coordinaron. En cuanto a la coordinación, las fases fueron cambiadas para la optimización de la red en comparación con el escenario real y tienen una relación entre sí.

Para el tercer escenario se utilizaron recuentos que se realizan a través de los sensores colocados en puntos de estrategias. Estos puntos se ubican como se muestra en la *Figura 3-7* con círculos de color rojo en la entrada del eje en la dirección Este y Oeste, pero para el Norte y el Sur se ubican en la intersección de la avenida Luis Pasteur porque se dio la mayor acumulación de vehículos en las intersecciones que cruzan el eje. Para este escenario se modificó la fase de activación para dar secuencia y un desplazamiento diferente respecto al primer escenario porque ayudó a coordinar las señales de tráfico. El ciclo total fue homogéneo de 160 segundos con 20 segundos constantes para el transporte público.

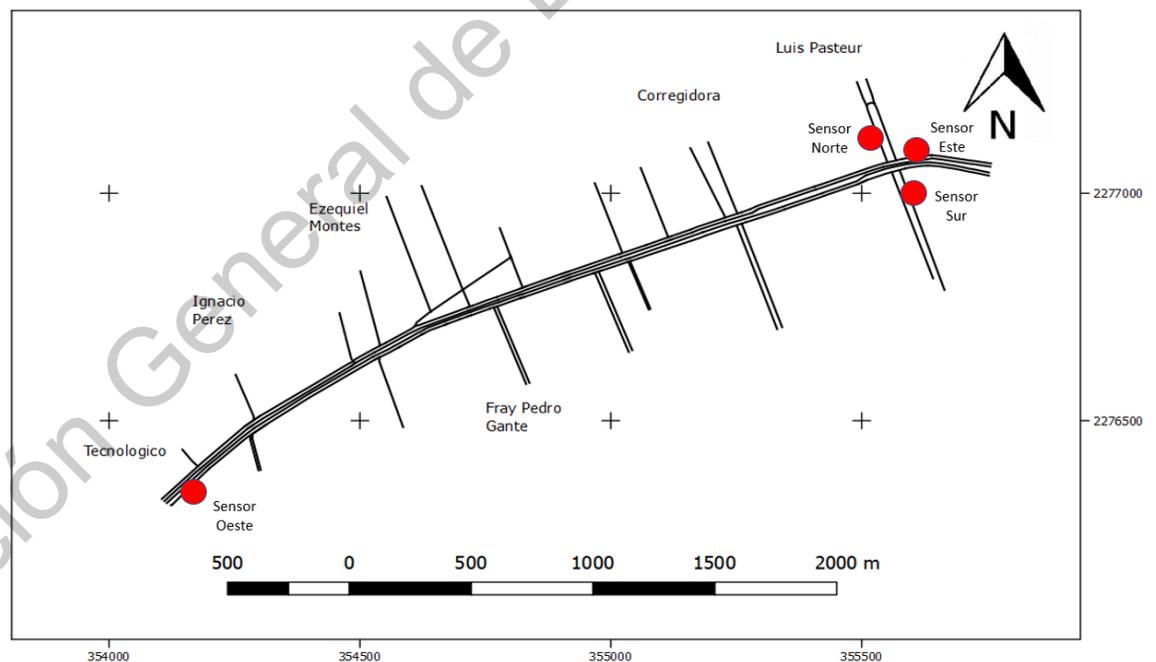


Figura 3-7. Ubicación de los sensores en escenario coordinado

Fuente: Elaboración propia

La duración de cada fase se calculó a través de la acumulación de conteo cuando una fase estaba en rojo y se multiplicó por un factor obtenido de manera

experimental. Aunque se calcula un tiempo verde en los recuentos mínimos, cada fase tiene un mínimo verde y un máximo verde. Además, cuando el sensor detecta que la cola es larga hasta la ubicación del sensor en la fase roja, envía la señal para dar el máximo verde a la fase como se ve en el diagrama de la *Figura 3-8*. Los sensores se ubicaron a 100 metros de la línea de parada como se observa en el diagrama de la *Figura 3-7*.

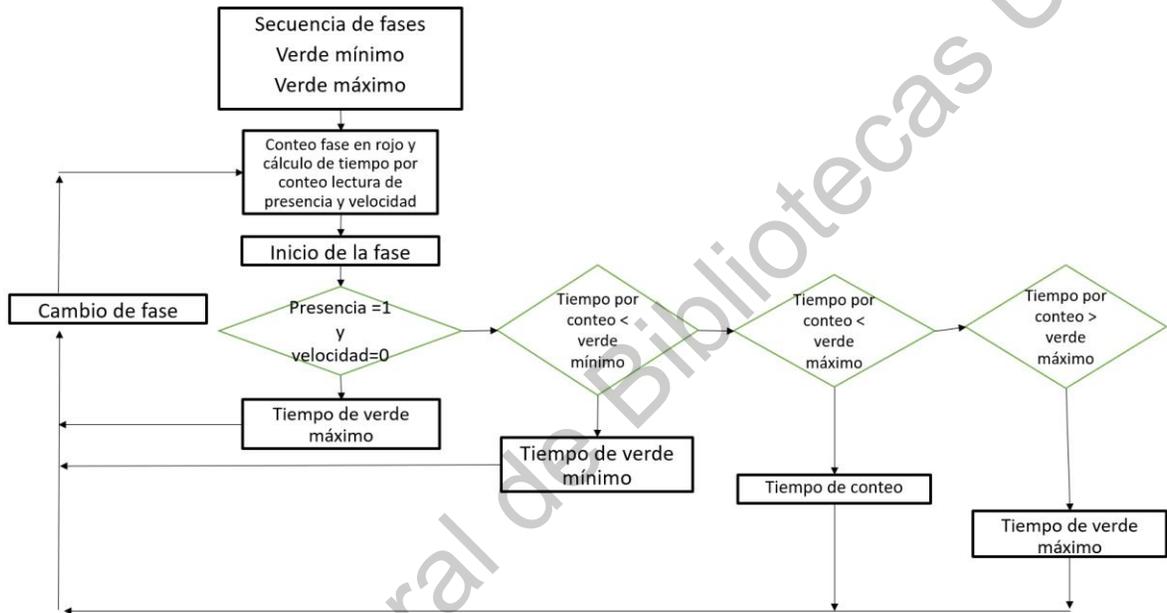


Figura 3-8. Diagrama del algoritmo de activación de las fases semafóricas

Fuente: Elaboración propia

3.4 Escenario con Semáforos Coordinados con Prioridad al transporte Público

El cuarto escenario se desarrolló de la misma manera que el tercer escenario, pero con el ajuste de las secuencias de activación de las fases en la red de semáforos dando prioridad al transporte público. Los sensores fueron colocados en el mismo lugar y a la misma distancia que en el escenario anterior. Una de las diferencias con el escenario anterior es que se cambió la constante de 20 segundos en cada ciclo para el transporte público.

3.5 Aplicación del algoritmo y obtención de resultados

Una vez aplicado los algoritmos, se realizaron las comparativa de la variable de estudio que son las demoras, se calculó en porcentaje la comparativa del estado actual con el de semáforos actuados para determinar su mejora. También se analizan otras variables como es el caso de número de paradas, velocidad y flujo.

Dirección General de Bibliotecas UNO

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Uno de los aspectos más importantes en esta investigación fue la calibración y validación del escenario actual llamado también escenario uno. Este apartado es importante porque de esta red validada y calibrada se desarrollaron los algoritmos, por lo que debía de representar de manera adecuada la realidad además de que es el punto de comparación de los demás escenarios para saber si el comportamiento había mejorado. El desarrollo de los escenarios corresponde a la hora de máxima demanda de acuerdo a los conteos realizados en campo correspondiente a 7:30 a.m. a 8:30 a.m. Además, se introdujeron los otros datos obtenidos en campo referenciados en la parte de metodología para validar y calibrar la red. Los resultados de validación y calibración se muestran a continuación.

En cuanto al apartado gráfico de la validación, en la *Figura 4-1* se muestra en color azul el conjunto de datos reales que corresponden a los valores de los conteos de cada una de las fases en las intersecciones, mientras que en color negro se muestran los valores de los conteos de los detectores virtuales en los que se obtuvieron los conteos de los vehículos a través del tiempo de simulación. En comparativa, la mayoría de los sensores muestran una cercanía de los valores simulados con los reales, esto demuestra que la red se está representando de manera adecuada. De manera gráfica, también se ve que los conteos que más muestran disparidad entre el conteo real y simulado es el sensor denominado SO6 que corresponde al sensor de flujo poniente a oriente en la intersección con avenida Tecnológico, esto debido probablemente a que hay cierta discrepancia con el levantamiento de los datos porque no se hicieron las mediciones el mismo día debido a la falta de recursos. En adición a lo anterior, cabe señalar que lo ideal para que la simulación tuviera valores muy precisos se tendría que haber hecho todas las mediciones el mismo día al mismo tiempo.

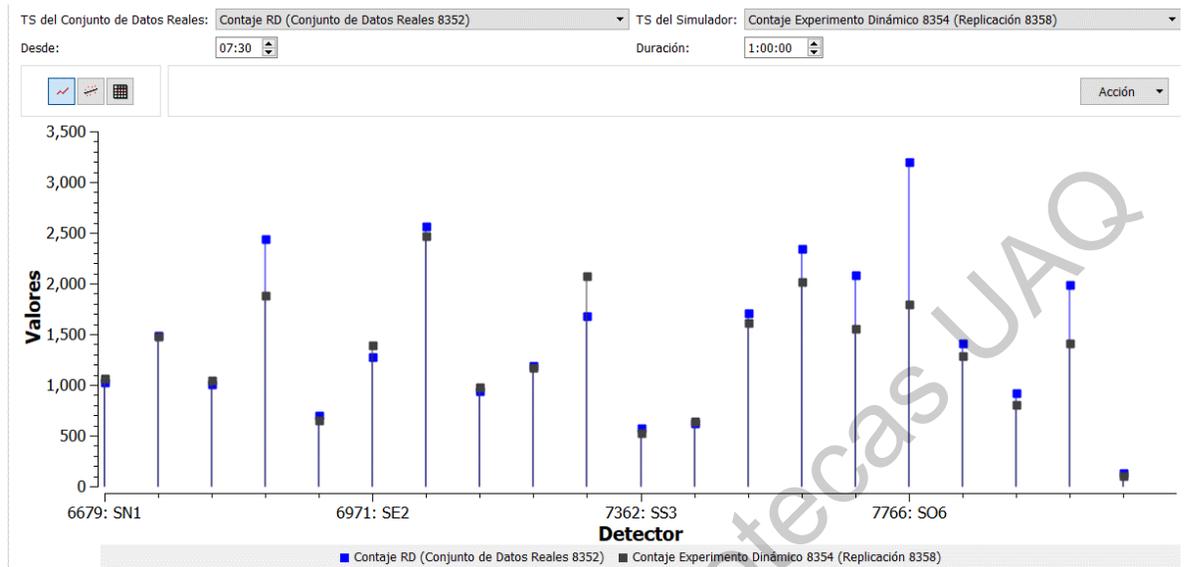


Figura 4-1. Comparativa gráfica de datos reales con simulados mediante detectores

Fuente: Elaboración propia

Otro de los aspectos analizados en la validación de la red fue regresión como se muestra en la Figura 4-2 dando la ecuación de la recta de regresión de la siguiente manera:

$$y = 315.241 + 0.670987x \quad (15)$$

También se obtuvo la siguiente R cuadrada:

$$Rsq= 0.787974 \quad (16)$$

La R cuadrada es muy cercana al 80 por ciento por lo que se toma como buena.

El error cuadrático medio *rmsi* fue igual a 3.1, este parámetro entre más cercano a cero resulte se considera como un mejor ajuste de la validación, por lo que se acepta este valor.

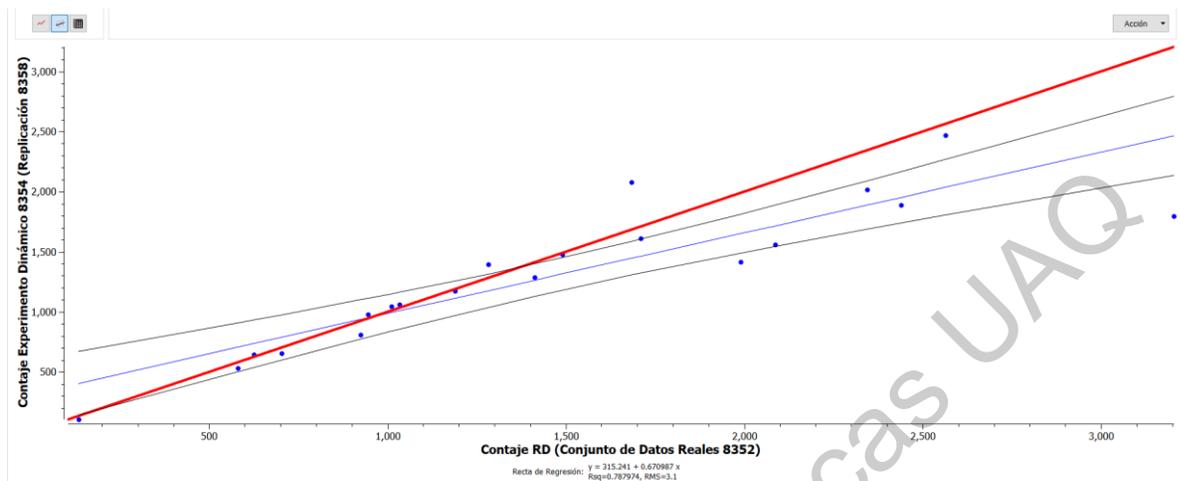


Figura 4-2 Estadística para el modelo de validación- Vista de Regresión

Fuente: Elaboración propia

Otros resultados son mostrados en la Tabla 4-1, en donde encontramos información de los sensores de manera tabular, de esta manera se observa la comparativa del conteo de datos reales con el obtenido a través de la simulación con los detectores virtuales. Además, también refleja la diferencia absoluta y relativa en porcentaje de la comparativa antes mencionada. Por último, se muestra la columna con el cálculo del GEH que es un parámetro estadístico en la ingeniería de tránsito, de manera descendente se observa que del sensor denominado SO6 al sensor SO3 son valores inaceptables de acuerdo a la bibliografía. En adición, el detector denominado SO3 y SO4 de acuerdo a la bibliografía requieren más investigación. Por último, el resto de los valores de GH de los sensores son aceptables en la validación. El valor promedio de los sensores es de 5.43, muy cercano al 5 de valor aceptable, teniendo en cuenta las posibles razones ya mencionadas de variación se da el valor general como bueno.

Tabla 4-1. Estadística para el modelo de validación- Vista de Tabla

Fuente: Elaboración propia

	Objeto	Contaje RD (Conjunto de Datos Reales 8352)	Contaje Experimento Dinámico 8354 (Replicación 8358)	Diferencia Absoluta	Diferencia Relativa (%)	GEH
	7766: SO6	3204	1796	-1408	-43.9451	28.16
	7813: SO5	1990	1416	-574	-28.8442	13.9093
	7765: SE6	2087	1557	-530	-25.3953	12.4166
	6682: SO1	2439	1887	-552	-22.6322	11.8689
	7361: SO3	1684	2078	394	23.3967	9.08452
	7400: SO4	2344	2018	-326	-13.9078	6.98055
	7812: SN5	925	807	-118	-12.7568	4.0098
	7811: SE5	1413	1287	-126	-8.9172	3.42929
	6971: SE2	1283	1397	114	8.88542	3.11424
	7814: SS5	134	105	-29	-21.6418	2.65286
	7399: SE4	1710	1611	-99	-5.78947	2.42949
	7362: SS3	580	529	-51	-8.7931	2.16581
	6970: SN2	704	654	-50	-7.10227	1.91882
	6972: SO2	2565	2470	-95	-3.7037	1.89338
	6681: SS1	1011	1047	36	3.56083	1.12226
	6973: SS2	946	979	33	3.48837	1.06369
	6679: SN1	1033	1063	30	2.90416	0.926703
	7398: SN4	625	647	22	3.52	0.872357
	7360: SE3	1189	1176	-13	-1.09336	0.378044
	6680: SE1	1491	1479	-12	-0.804829	0.3114
	Media	1467.85	1300.15	-167.7	-11.4249	5.4354

Con todos los parámetros obtenidos de validación y calibración mencionados anteriormente, se notan ligeras deficiencias debido probablemente a la obtención de los datos. Sin embargo, los parámetros en los que no se cumple la validación muestran valores muy cercanos a los aceptables por lo que se toma como buena la validación.

El propósito del desarrollo del algoritmo es ser evaluado y probado bajo condiciones de tráfico simuladas. Se simularon cuatro escenarios; el primero es el escenario de comportamiento actual; El segundo escenario fue la simulación con semáforos actuados libres; el tercero con semáforos coordinados con sensores y el cuarto con semáforos coordinados con sensores con prioridad al transporte público. Para el caso de semáforos actuados libres, los sensores se colocaron a 53 metros de la línea de parada, la extensión de la unidad de tiempo fue usada de tres segundos recomendada por la bibliografía. Para el caso del escenario con semáforos coordinados y sensores, se colocaron los sensores a 100 metros de la línea de parada.

La Tabla 4-2 muestra los resultados obtenidos de las demoras, la velocidad y la mejora que proporcionó cada uno de los escenarios como resultado la implementación de los algoritmos. Analizando la Tabla 4-2 se concluye que la hipótesis planteada de una reducción de las demoras del 15 por ciento se ve cumplida por casi todos los escenarios, solo el cuarto escenario se queda cerca de cumplir, pero sigue demostrando competitividad.

Tabla 4-2 Comportamiento de la red en los escenarios desarrollados

	Demoras (s/km)	Mejora (%)	Velocidad Promedio (km/h)	Mejora (%)
Escenario 1	462.56	n/a	15.43	n/a
Escenario 2	278.25	39.8	19.2	24.4
Escenario 3	333.25	28.0	19.57	26.8
Escenario 4	395.02	14.6	16.44	6.5

El comportamiento de las demoras en el tiempo de la hora pico se observa en la *Figura 4-3*, la reducción de las demoras es evidente en comparativa con el escenario actual, en ella también se observa que el escenario que mejor

comportamiento en el apartado de las demoras fue el de semáforos actuados libres seguido del escenario tres y del escenario cuatro.

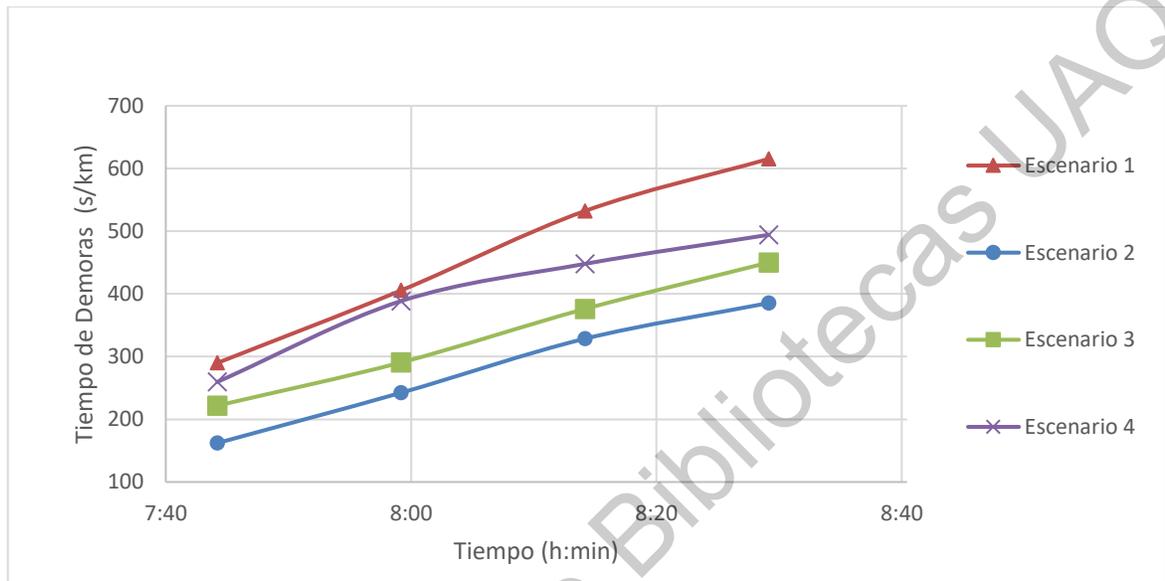


Figura 4-3. Comparativo de las demoras de los escenarios

Fuente: Elaboración propia

Otra de las variables analizadas fue la velocidad. En la *Figura 4-4* se observa el comportamiento de los escenarios de estudio. En todos los casos se observa una mejora de la velocidad a través del tiempo en comparación del escenario actual que corresponde al escenario uno. Además, la velocidad del escenario con semáforos actuados libres empieza con mejor velocidad promedio respecto al escenario con semáforos coordinados, pero esta tiene una tendencia decreciente desde el comienzo, en adición después de las 8:00 a.m. se observa un cruce en la gráfica con respecto al escenario tres mientras que el escenario con semáforos coordinados tiene una caída de velocidad mínima desde el inicio de la simulación pero después de las 8:00 a.m. tiene un repunte y mejora en su velocidad. Para este apartado el mejor comportamiento se obtuvo con el escenario tres que corresponde al escenario con semáforos coordinados.

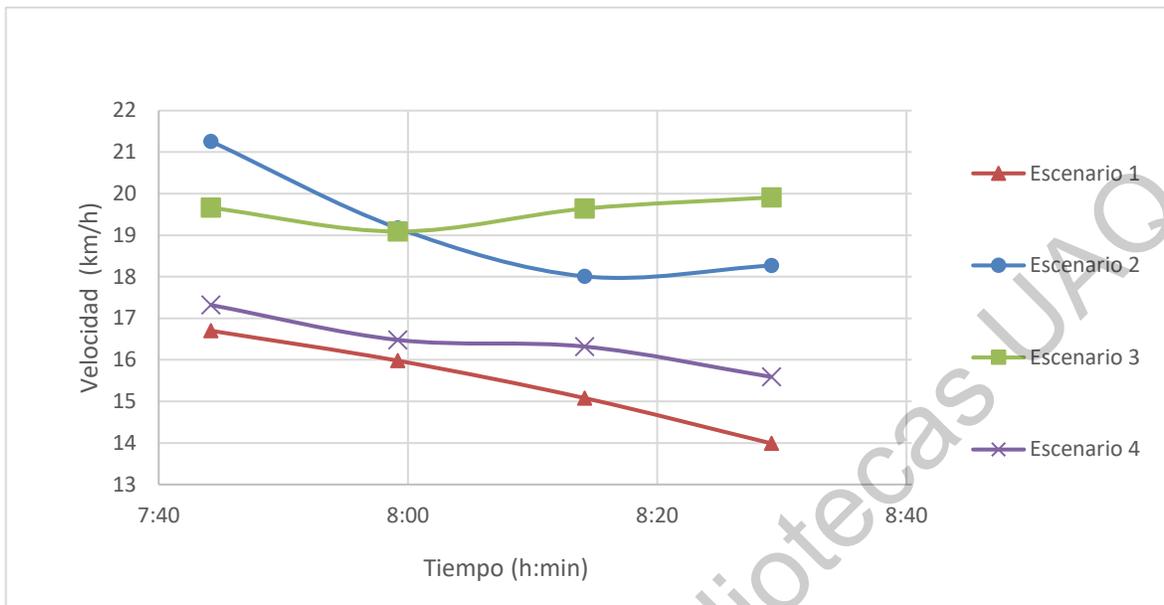


Figura 4-4. Comparativo de las velocidades promedio de los escenarios

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente se analizó el número de paradas y su tiempo promedio de los diferentes escenarios comparados en la *Figura 4-5* y *Figura 4-6* respectivamente. En el apartado del número de paradas se observa que el escenario tres correspondiente a semáforos coordinados es el más competitivo ya que es el que mantiene en promedio el número de paradas más estable y menor, aunque en el tiempo de parada se ve superado por el escenario dos. Por otro lado, el escenario uno y cuatro tienen comportamientos muy similares en el número de paradas, aun así, se debe de recordar que el escenario cuatro tiene prioridad al transporte público y también cuenta con un menor tiempo de parada promedio. Por último, el escenario con semáforos actuados libres o escenario dos es el que más paradas tiene, sin embargo, en la *Figura 4-6* donde se analiza el tiempo promedio de parada se observa que es el escenario con menor tiempo de paradas haciéndolo competitivo.

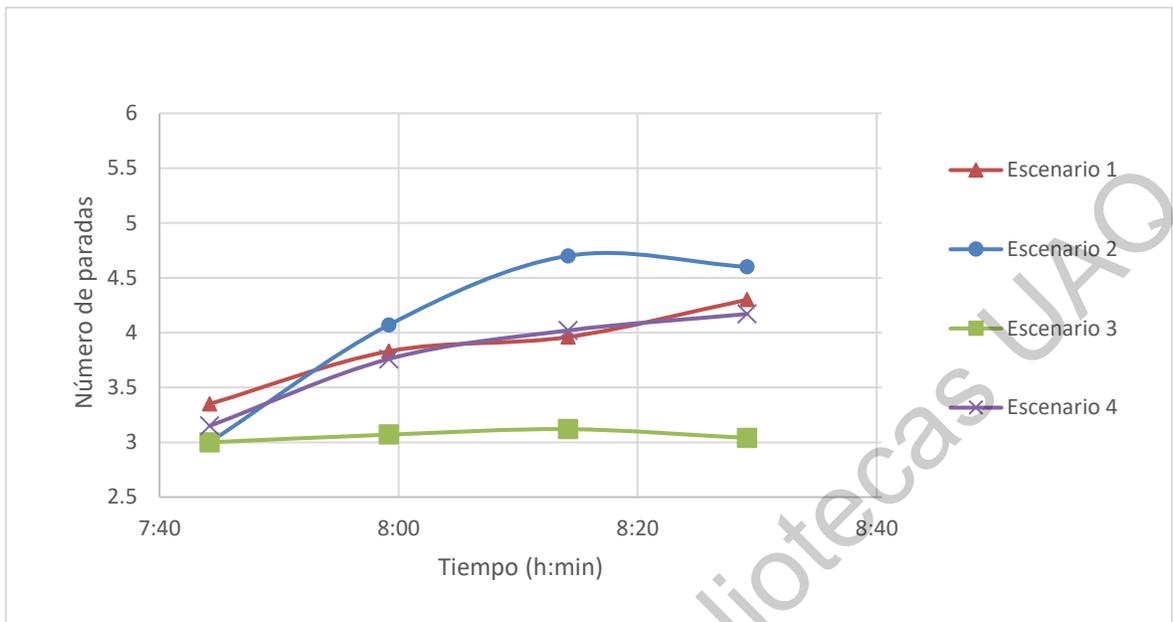


Figura 4-5. Comparativo del número de paradas promedio de los escenarios

Fuente: Elaboración propia

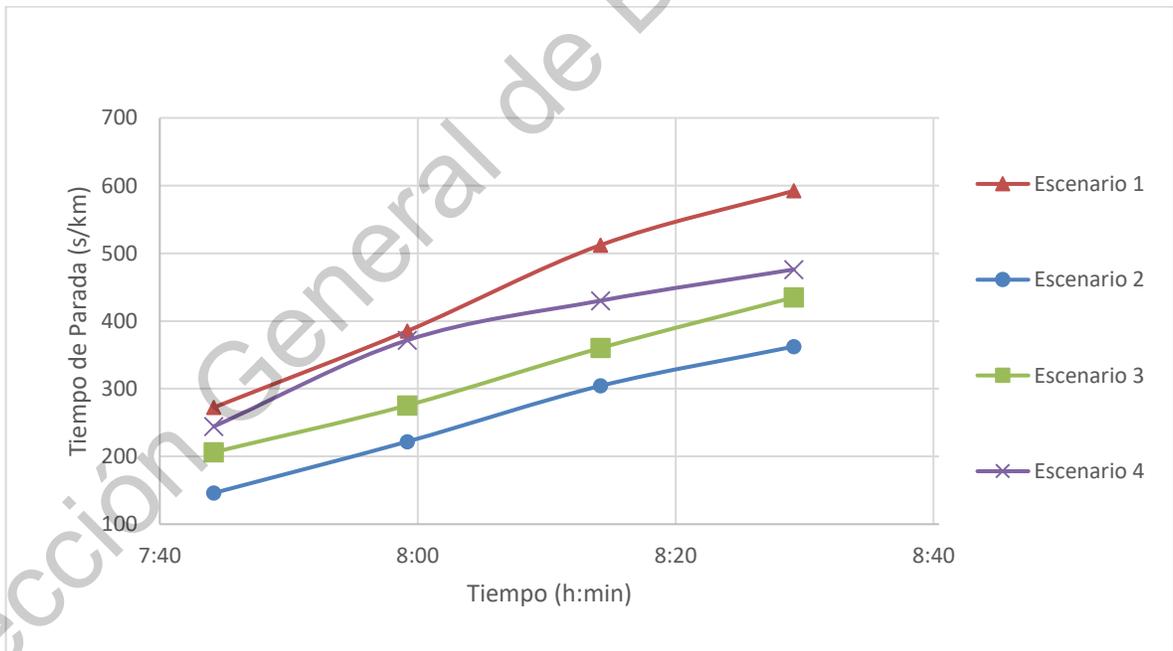


Figura 4-6. Comparativo del tiempo de paradas promedio de los escenarios

Fuente: Elaboración propia

El flujo es otro parámetro que se analizó en esta investigación y está referenciado en la *Figura 4-7*. En este sentido, se muestra que el escenario tres a pesar de tener un punto de inflexión es el más competente, este escenario corresponde a los semáforos coordinados con sensores. Otro de los que muestra competitividad es el escenario con semáforos actuados libres correspondiente al escenario dos que mantiene una tendencia de decremento en el flujo. En último lugar, con menor flujo es el escenario cuatro que corresponde al escenario con semáforos coordinados con prioridad al transporte público, en este sentido este escenario deja de ser tan relevante este aspecto ya que se daría movilidad a una mayor cantidad de usuarios.

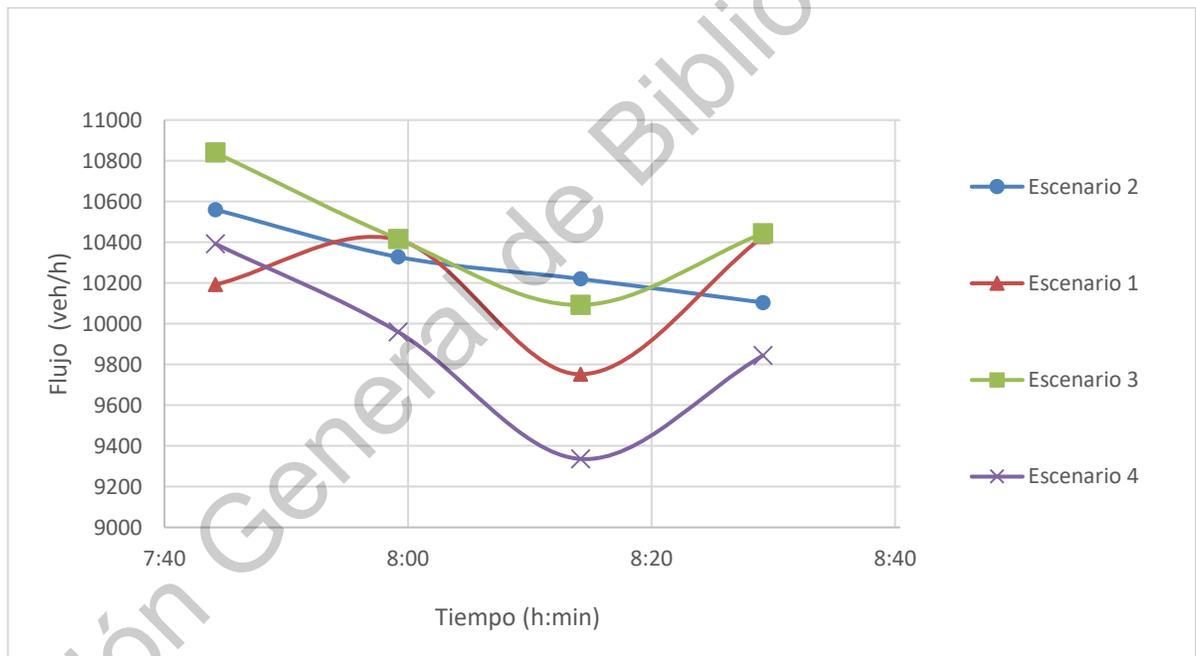


Figura 4-7 Comparativo del flujo de los escenarios

Fuente: Elaboración propia

Otro de los aspectos analizados fueron los contaminantes. Los contaminantes analizados fueron dióxido de carbono (CO_2) y NO_x , que hace referencia a un grupo de gases reactivos como el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2). En la Tabla 4-3 se observa que todos los escenarios mostraron una mejora en la reducción de contaminantes excepto el escenario dos

correspondiente a los semáforos actuados libres, esto debido probablemente a el número de paradas mayor que mostró la simulación al igual que su tendencia decreciente de flujo mostradas anteriormente. El aumento de emisiones de estos gases fue de 3.32 por ciento para el dióxido de carbono (CO₂) y de 2.83 por ciento para el NO_x. Por su parte el escenario tres correspondiente a semáforos coordinados registró una reducción del 20.13 por ciento para el dióxido de carbono (CO₂) y de un 72.05 por ciento para el NO_x, esto debido a la baja cantidad y tiempo de paradas además de una velocidad promedio más constante y aumento de flujo después de las 8:15 a.m. como lo mostró la *Figura 4-7*. Por último, el escenario cuatro correspondiente a los semáforos coordinados con sensores y prioridad al transporte público mostró una reducción de emisiones del 15 por ciento para ambos grupos de contaminantes.

Tabla 4-3. Contaminantes producidos durante el periodo de simulación

Fuente: Elaboración propia

	CO ₂ (g)	NO _x (g)
Escenario 1	4214370.13	13607.97
Escenario 2	4354158.23	13993.8
Escenario 3	3365972.52	3803.55
Escenario 4	3546876.65	11500.27

El transporte público en este corredor cuenta con un carril exclusivo. Tomando en cuenta lo anterior se desarrolló el escenario cuatro dándole prioridad al paso de este. En la Tabla 4-4 se muestra la comparativa de los escenarios de los resultados de las simulaciones del transporte público. Se puede ver en la Tabla 4-4 que el escenario cuatro muestra mejora en todos los elementos analizados como son demoras-, velocidad promedio, número de paradas y tiempo de paradas. Por su parte el escenario dos y tres se observan que incluso empeoraron en la mayoría de los elementos analizados.

Tabla 4-4. Resultados de la simulación del transporte público

Fuente: Elaboración propia

	Demoras (s/km)	Mejora (%)	Velocidad promedio (km/h)	Mejora (%)	Número de paradas	Mejora (%)	Tiempo de paradas (s/km)	Mejora (%)
Escenario 1	301.68	n/a	10.87	n/a	3.91	n/a	271.29	n/a
Escenario 2	323.13	-7.11	10.98	1.01	4.38	-12.02	290.14	-6.94
Escenario 3	377.71	-25.20	9.16	-15.73	4.33	-10.74	344.68	-27.05
Escenario 4	259.89	13.85	13.05	20.05	3.75	4.09	232.25	14.39

Dirección General de Bibliotecas UTAQ

5. Conclusiones

En esta investigación se desarrollaron algoritmos en línea que tiene como objetivo mantener la funcionalidad adaptativa de los controladores accionados. Mediante los algoritmos desarrollados se obtuvo una mejora sustancial en los diferentes parámetros analizados. La simulación se usó en una red calibrada para probar la eficiencia del algoritmo en línea, esto tiene sentido en la forma en que el algoritmo podría adaptarse a las condiciones reales del tráfico y usar el tiempo de fase óptimo. Los algoritmos muestran que tiene el potencial de reducir los retrasos y las demoras en el eje de estudio que funciona bien en la hora pico ya que la mayoría de los escenarios analizados cumplieron con la hipótesis planteada de la reducción de las demoras en 15 por ciento con excepción del escenario enfocado al transporte público que se quedó cerca con un 14.6 por ciento. El escenario desarrollado enfocado al transporte público es interesante ya que, si se desarrolla una buena planeación de las rutas del transporte público, así como si se mejora su eficiencia podría abastecer una mayor demanda de usuarios que el transporte particular reduciendo el número de vehículos en las vialidades y a su vez la contaminación y el tráfico.

De los escenarios analizados el más competitivo de acuerdo a los escenarios es el escenario con semáforos coordinados y sensores que se le asignó el nombre de escenario tres, esto es debido a que se comporta de manera más consistente en la mayoría de las variables analizadas. El escenario dos de semáforos actuados libres a primera vista parece ser competente pero cuando se analizan todos los parámetros se notan algunas deficiencias como es el apartado de los contaminantes, las emisiones de este escenario aumentaron en porcentajes bajos, pero esto podría empeorar con la demanda creciente de flujo en la zona.

El escenario con semáforos coordinados con sensores y prioridad al transporte público es el escenario con mayor potencial de crecimiento, a este le faltaría la planeación adecuada para satisfacer la demanda creciente, así como una mayor eficiencia de parte de los concesionarios. De los escenarios desarrollados este fue

el que tuvo mejoras menores en la mayoría de los apartados, pero es el que más podría ayudar a dar solución a la demanda de movilidad.

Los algoritmos desarrollados tienen la ventaja de reducir demoras y mejorar la velocidad en el eje de estudio, para su implementación es necesario buscar el tipo adecuado de sensores que traiga equilibrio con el costo de implementación y tengan facilidades para aplicarlos rápidamente porque el eje es una de las vialidades principales de la ciudad. Una diferencia principal con otros trabajos relacionados es que el algoritmo desarrollado necesita pocos datos para funcionar y estos datos podrían ser alimentados a través del tiempo con el mismo algoritmo una vez implementado para ajustar los ciclos de tiempo.

En cuanto a las líneas de investigación futura, uno de los trabajos podría ser la optimización del transporte público mediante el equipamiento de rastreadores en las rutas, esto ayudaría a diseñar un algoritmo más eficiente ya que se tendría la información de la ubicación del vehículo y ayudaría con los tiempos de llegada tanto a las estaciones de ascenso y descenso como de la llegada a las intersecciones.

6. REFERENCIAS

- Amirjamshidi, G., & Roorda, M. J. (2017). Multi-objective calibration of traffic microsimulation models. *Transportation Letters*.
- Antoniou, C., Barcelo, J., Brackstone, M., Celikoglu, H. B., Ciuffo, B., Punzo, V., & Wagner, P. (2014). Traffic Simulation: Case for guidelines.
- Black, W. R. (2003). *Transportation: a geographical analysis*. New York: Guilford.
- Boxill, S. A., & Yuan, L. (2000). Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development. *Technical report SWUTC/00/167602-1*.
- Brackstone, M., Sykes, P., & Vortisch, P. (2013). Guidelines for Micro Simulation Modelling, Calibration and Validation; An Examination of Gaps, Issues and Needs. *Traffic Engineering & Control*, 55(5).
- Caliendo, C., & Guida, M. (2012). Microsimulation Approach for Predicting Crashes at Unsignalized Intersections Using Traffic Conflicts. *Journal of Transportation Engineering*, 138(12).
- Chowdhury, D., Wolf, D. E., & Schreckenberg, M. (1997). Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: effects of lane-changing rules. *Physica A*, 235(3-4), 417-439.
- Daganzo, C. F. (2007). Urban Gridlock: Macroscopic Modeling and Mitigation Approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41, 49–62.
- Dowlin, R., Skabardonis, A., Halkias, J., McHale, G., & Zammit, G. (2004). Guidelines for calibration of microsimulation models: framework and applications. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1876(1), 1-9.

- Edara, P., Teodorovic, D., Triantis, K., & Natarajan, S. (2011). A simulation-based methodology to compare the performance of highway space inventory control and ramp metering control. *Transp. Plan. Technol.*, 58, 705-713.
- Fuller, R., McHugh, C., & Pender, S. (2008). Task difficulty and risk in the determination of driver behaviour [la difficulté de la tâche et le risque dans le comportement des conducteurs]. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 58, 13-21.
- Godthelp, H., Milgram, P., & Blaauw, G. J. (1984). The development of a time-related measure to describe driving strategy. *Human Factors*, 26(3), 257-268.
- Gorodokin, V., Almetova, Z., & Shepelev, V. (2016). Procedure for Calculating On-Time Duration of the Main Cycle of a Set of Coordinated Traffic Lights. *Transportation Research Procedia*, 20, 231-235.
- Gou, Q., Li, L., & Ban, J. X. (2019). Urban traffic signal control with connected and automated vehicles: A survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.
- Hawas, Y. E. (2002). Calibrating simulation models for ATIS/ATMS applications. *Journal of Transportation Engineering*, 128(1), 80-88.
- Hawas, Y. E. (2007). A microscopic simulation model for incident modeling in urban networks. *Transport Planning and Technology*, 30, 289-309.
- He, J., & Hou, Z. (2012). Ant Colony Algorithm for Traffic Signal Timing. *Advances in Engineering Software*, 43, 14-18.
- He, J., & Hou, Z. (2016). Special Issue on Intelligent Transportation Systems, Big Data and Intelligent Technology. *Advances in Engineering Software*.
- Hollander, Y., & Liu, R. (2008). The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, 347-362.

- Hrabovec, J., & Hantuch, L. (1997). Application of Genetic algorithms in Control. *STU, FE, Department of Automation and Control*.
- Huff, D. L. (2003). Parameter estimation in the Huff model. *ArcUser*, 34-36.
- Hurter, P. A., & Moses, N. L. (1964). Transportation Investment and Regional Development. *Journal of the American Institute of Planners*, 30(2), 132-139.
- Int Panis, L., Broekx, S., & Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of the total environment*, 371(1), 270-285.
- Jarašūniene, A. (2007). Research into intelligent transport systems (ITS). *Transport*, 22(2), 61-67.
- Jie, L., Van Zuylen, H., Chen, Y., Viti, F., & Wilmink, I. (2013). Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 31, 172-184.
- Joyanes, J. (2008). *FUNDAMENTOS DE PROGRAMACIÓN, Algoritmos, estructura de datos y objetos*. Madrid: McGRAW-Hill.
- Kergaye, C., Stevanovic, A., & Martin, P. (2010). Comparative Evaluation of Adaptative Traffic Control System Assessments Through Field and Microsimulation. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 109-124.
- Kerner, B. S., & Klenov, S. (2003). Microscopic theory of spatial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks. *Physical Review E*, 68.
- Kleijnen, J. C. (1995). Theory and Methodology: Verification and Validation of Simulation Models. *European Journal of Operational Research*, 82, 145-162.
- Law, A. M., & Kelton, W. D. (1991). *Simulation Modeling and Analysis* (Segunda Edición ed.). McGraw-Hill International Editions.

- Leal, S., de Almeida, P., & Chung, E. (2017). Active control for traffic lights in regions and corridors: an approach based on evolutionary computation. *Transportation Research Procedia*, 25, 1769-1780.
- Litescu, C., Viswanathan, V., Aydt, H., & Knoll, A. (2017). Information Dynamics in Transportation Systems with Traffic Lights Control. *Procedia Computer Science*, 80, 2019-2029.
- Liu, Y.-Y., Slotine, J.-J., & Barabási, A.-L. (2011). Controllability of complex networks. *Nature*, 473(7346), 167-173.
- Madi, M. (2016). Investigating and calibrating the dynamics of vehicles in traffic micro-simulations models. *Transportation Research Procedia*, 14, 1782-1791.
- Moisio, L. (2016). Intelligent Transport System-RRUKA Special Issue- Editorial. *IET Intelligent Transport Systems*, 10(1), 1-2.
- Novikov, A., Novikov, I., Katunin, A., & Shevtsova, A. (2017). Adaptation Capacity of the Traffic Lights Control Systems (TSCS) as to Changing Parameters of Traffic Flows Within Intellectual Transport Systems (ITS). *Transportation Research Procedia*, 20, 455-462.
- Osorio, C., & Bierlaire, M. (2008). A multiple model approach for traffic signal optimization in the city of lausanne. *Transport Research Conference*. Swiss: RANSP-OR CONF-2006-078.
- Palat, B., & Delhomme, P. (2014). A simulators study of factors influencing driver's behavior at traffic lights. *Transportation Research Part F*, 37, 107-118.
- Panis, L., Broekx, S., & Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits.

- Paul, A., Chilamkurti, N., Daniel, A., & Rho, S. (2017). *Intelligent Vehicular Networks and Communications Fundamentals, Architectures and Solutions*. United Kingdom: ELSEVIER.
- Pidd, M. (1992). *Computer Simulation in Management Science*. John Wiley.
- Porter, B. E., & Berry, T. D. (2001). A nationwide survey of self-reported red light running: Measuring prevalence, predictors, and perceived consequences. *Accident Analysis and Prevention*, 33(6), 735-741.
- Qi, Y., Teng, H., & Martinelli, D. R. (2009). An investigation of incident frequency, duration and lanes blockage for determining traffic delay. *Journal of Advanced Transportation*, 43, 275-299.
- QUARTET Deliverable N°2. (1992). Assessment of current Tools for Environmental Assessment in QUARTET, DRIVE II Project V2018: QUARTET, September 1992.
- Radhakrishnan, P., & Mathew, T. V. (2011). Passenger Car Units and Saturation Flow Models for Highly Heterogeneous Traffic at Urban Signalised Intersections. *Transportmetrica*, 7(2), 141-162.
- Rakha, H., & Crowther, B. (2002). Comparison of Greenshields, Pipes, and Van Aerde car-following and traffic stream models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1802(1), 248–262.
- Ratting, R. A., Chapline, J. F., & Williams, A. F. (2002). Changes Crash Risk Following Re-Timing of Traffic Signal Change intervals. *Accident Analysis and Prevention*(34), 215-220.
- Roess, R., Prassas, E., & McShane, W. (2004). *Traffic Engineering*. United States of America: Pearson Prentice Hall.

- Sheu, J. -B. (2003). A stochastic modeling approach to real-time prediction of queue overflows. *Transportation Science*, 97-119.
- Sheu, J. -B. (2011). Microscopic traffic behaviour modelling and simulation for lane-blocking arterial incidents. *Transportmetrica*, 1-23.
- Sheu, J. -B., & Ritchie, S. G. (2001). Stochastic modeling and real-time prediction of vehicular lane changing behavior. *Transportation Research-Part B*, 35(7), 695–716.
- Song, G., Yu, L., & Xu, L. (2013). Comparative Analysis of Car-Following Models for Emissions Estimation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2341(1), 12-22.
- Song, G., Yu, L., & Zhang, Y. (2012). Applicability of Traffic Microsimulation Models in Vehicle Emissions Estimates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2270(1), 132-141.
- Spall, J. C., & Chin, D. C. (1997). Traffic-Responsive Signal Timing for System-Wide Traffic Control. In M.G. Karlaftis (Eds). *Transportation Research - C*, 5, 153-163.
- Tate, J. (2013). York Low Emission Zone Feasibility Study- Vehicle Emission Modelling. *Institute for Transport Studies*.
- Tate, J. (2013). York Low Emission Zone Feasibility Study- Vehicle Emission Modelling. *Institute for Transport Studies*.
- Teodorovic´, D., & Janic´, M. (2017). *Transportation Engineering. Theory, Practice*,. Oxford, United Kingdom: Elsevier.
- Vilarinho, C., Soares, G., Macedo, J., Tavaresa, J., & Rosetti, R. (2014). Capability-Enhanced AIMSUN with Real-Time Signal Timing Control. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 262-271.

Webster, F. V. (1958). Traffic Signal Settings. In: Road Researcher Laboratory. *Road Research Technical Paper n.º 39*.

Zargari, S., Dehghani, N., & Mirzahosseini, H. (2016). Optimal traffic lights control using meta heuristic algorithms in high priority congested networks. *Transportation Letters*.

Zheng, X., & Recker, W. (2013). An adaptive control algorithm for traffic-actuated signals. *Transportation Research Part C*, 30, 93-115.

Dirección General de Bibliotecas UAO