

2021

Optimización de un sistema de semáforos
mediante simulación empleando un vehículo
flotante

Ing. Sergio Luis Montiel
Rodríguez



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**Optimización de un sistema de semáforos mediante simulación
empleando un vehículo flotante**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Sergio Luis Montiel Rodríguez

Dirigida por:

M. I. Marco Luis Dorado Pineda

Querétaro, Qro. a Mayo 2021



C.U., Querétaro, Qro., mayo 2021
Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingenierías
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Optimización de un sistema de semáforos mediante simulación empleando un
vehículo flotante

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Ing. Sergio Luis Montiel Rodríguez

Dirigido por:

M. I. Marco Luis Dorado Pineda

M.I. Marco Luis Dorado Pineda
Presidente

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Secretario

Dr. Ricardo Montoya Zamora
Vocal

Dr. Roberto de la Llata Gómez
Suplente

M. I. Pedro Apolinar Molina González
Suplente

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Fecha: Mayo 2021

RESUMEN

El congestionamiento de las redes viales trae consigo consecuencias desfavorables para el medio ambiente, la salud y la economía. Una de las principales causas es el aumento del parque vehicular, el cual ocasiona que la interacción entre las unidades que circulan por las vialidades urbanas saturan el sistema, generando interrupciones del flujo vehicular en determinadas secciones de la red, aumentando así el número de demoras y los tiempos de viaje. Otra condición a la que se asocian las demoras son los sistemas de control de tránsito. Los semáforos se emplean para regular el paso de los vehículos de manera alternada en una intersección, de tal forma que los vehículos permanecen parados a la espera de la luz verde, la cual indica que pueden continuar su recorrido. Para lograr el aumento de la velocidad de recorrido y minimizar los tiempos de demora asociados, es necesario que el sistema de semáforos sucesivos este correctamente coordinado, para conseguirlo se propone emplear un vehículo flotante con capacidades de monitoreo del tránsito para estimar el flujo vehicular mediante un modelo de lógica difusa basado en la velocidad, la densidad y el flujo vehicular. Una vez que se cuenta con los datos necesarios, se realiza la coordinación de los tiempos de semáforo de las intersecciones consideradas en el sistema, obteniendo mejoras de hasta 54 % en la velocidad global y 36 % en los tiempos de recorrido.

(Palabras clave: vehículo flotante, GPS, lógica difusa, simulación, sistemas de control de tránsito, monitoreo del tránsito)

SUMMARY

The congestion of road networks has unfavorable consequences for environment, health and the economy. One of main causes is the increase in the number of vehicles, which causes the interaction between the units that circulate on urban roads to saturate the system, generating interruptions in the flow of vehicles in certain sections of the network, thus increasing the number of delays and travel times. Another condition associated with delays is traffic control systems. Traffic lights are used to regulate the passage of vehicles alternately in an intersection, in such a way that vehicles remain stopped waiting for the green light, which indicates that they can continue their journey. To achieve the increase in travel speed and minimize the associated delay times, it is necessary that the successive traffic light system is correctly coordinated, to achieve this it is proposed to use a floating vehicle with traffic monitoring capabilities to estimate the traffic flow through a fuzzy logic model based on speed, density and vehicular flow. Once the necessary data is available, the traffic light times of the intersections considered in the system are coordinated, obtaining improvements of at least 54 % in global speed and 36 % in travel times.

(Key words: floating vehicle, GPS, fuzzy logic, simulation, traffic control systems, traffic monitoring)

El aprendizaje es un simple apéndice de nosotros mismos;

*dondequiera que estemos,
está también nuestro aprendizaje.*

-William Shakespeare

*Rendirse es lo que destruye a la gente,
cuando te niegas con todo tu corazón a rendirte
entonces trasciendes tu humanidad.*

-Kohta Hirano

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por haberme abierto las puertas para adquirir nuevos conocimientos, permitirme formarme íntegramente en sus aulas y darme la oportunidad de vivir experiencias para forjar mi camino.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo y patrocinio otorgado a través de la Beca para Estudios de Maestría, mediante la cual se logró llevar a cabo esta investigación.

A la Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro, por su apoyo en la facilitación de información, la cual se empleó en esta tesis.

Mi agradecimiento sincero a mi Director de Tesis, el M. I. Marco Dorado, por su generosidad al brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia en un entorno de confianza y amistad. A su acertada orientación, apoyo y enseñanzas que permitieron llevar a buen fin esta investigación.

Agradezco a Dr. Saúl Obregón, Dr. Ricardo Montoya, Dr. Roberto de la Llata y M. I. Pedro Molina, quienes con sus atinados consejos y enseñanzas, me han apoyado a consolidar este trabajo de investigación.

A mi padre, quien siempre ha sido mi ejemplo a seguir en la vida, mi luz y esperanza en los momentos oscuros. Agradezco tu amor infinito y apoyo incondicional, por creer siempre en mí y priorizar mis necesidades a las tuyas, eres mi orgullo más grande y todos mis logros te los debo a ti.

A mi madre, quien a pesar de que ya no se encuentra a mi lado, vive eternamente en mis memorias y la siento tan cerca como siempre. Gracias por todo ese amor que trasciende en el tiempo, tus enseñanzas y consejos siempre guían mi camino, y tu nombre siempre me da valor para seguir adelante.

A mi hermano, con quien he recorrido este camino de crecimiento, soy el hermano más afortunado del mundo porque te tengo a ti, que siempre me has brindado tu apoyo, amor y confianza incondicional. Te agradezco por enseñarme a luchar por mis objetivos y ser mi más grande motivación.

A mis tías, que más que mis tías, las considero mis madres. Siempre han estado presentes sembrando en mí principios y valores que me han llevado a ser la persona que soy. Siento una gratitud inmensa hacia ustedes, quienes con sabiduría, amor, comprensión y cariño me han apoyado durante todo este trayecto.

Finalmente, a todas aquellas personas que de una u otra forma, me han apoyado a lo largo de este camino.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	18
1.3 OBJETIVO	19
1.4 HIPÓTESIS	19
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.1 CONGESTIONAMIENTO E INGENIERÍA DE TRÁNSITO	20
2.2 PARÁMETROS DEL FLUJO VEHICULAR	23
2.3 LÓGICA DIFUSA	26
2.4 METODOLOGÍA DEL VEHÍCULO FLOTANTE	33
2.5 IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO COLECTOR DE DATOS GPS	37
2.5.1 <i>De la programación de un dispositivo colector de datos</i>	40
2.6 SIMULACIÓN DEL TRÁNSITO	42
2.6.1 <i>De la implementación en los sistemas de control del tránsito</i>	45
3. METODOLOGÍA	54
3.1 PREPROCESO	54
3.1.1 <i>Determinación de la zona de estudio</i>	54
3.1.2 <i>Periodo de prueba</i>	58
3.1.3 <i>Tamaño de la muestra</i>	60
3.1.4 <i>Elaboración de un dispositivo colector de datos GPS</i>	63
3.2 RECOPIACIÓN DE DATOS EN CAMPO	71
3.2.1 <i>Propiedades geométricas y operativas de la vialidad Zaragoza</i>	71
3.2.2 <i>Recopilación de datos con el vehículo flotante</i>	81
3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS	82
3.3.1 <i>Parámetros del flujo vehicular</i>	82
3.3.2 <i>Modelo de estimación del tránsito con lógica difusa</i>	94
3.3.3 <i>Simulación y mejoramiento del sistema de control de tránsito</i>	100

3.4	DEL DISPOSITIVO COLECTOR DE DATOS GPS	106
3.5	DEL MODELO DE ESTIMACIÓN DEL TRÁNSITO CON LÓGICA DIFUSA	108
3.6	DE LA SIMULACIÓN DE TRÁNSITO.....	109
4.	CONCLUSIONES.....	121
5.	REFERENCIAS	124
6.	ANEXOS.....	135

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2-1	Función de membresía trapezoidal y triangular	25
2-2	Etapas del proceso de inferencia difusa	26
3-1	Diagrama de etapas de la metodología	51
3-2	Mapa de localización del municipio de Querétaro	52
3-3	Ubicación de la vialidad de estudio	53
3-4	Ruta y puntos de control del circuito	55
3-5	Diagrama del proceso de operación del dispositivo colector de datos GPS	61
3-6	Dispositivo colector de datos GPS	62
3-7	Diagrama de conexiones del dispositivo colector de datos	63
3-8	Recolección de muestras en las estaciones geodésicas	64
3-9	Gráficos de dispersión	65
3-10	Trazo geométrico del corredor Zaragoza, intersecciones de Juárez Sur y Corregidora	69
3-11	Composición vehicular	71
3-12	Centroides en el modelo de simulación	72
3-13	Diagramas de fase de la primera a la sexta intersección	76
3-14	Diagramas de fase de la séptima a la decimotercera intersección	77
3-15	Vehículo instrumentado	79
3-16	Histograma de velocidad	81
3-17	Ojiva de la velocidad	82
3-18	Histograma de densidad	83
3-19	Niveles de Densidad	85
3-20	Sección del recorrido con densidad baja	85
3-21	Sección del recorrido con densidad media	86
3-22	Sección del recorrido con densidad alta	87
3-23	Ojiva de frecuencias de los volúmenes vehiculares del corredor Zaragoza	87

3-24	Condiciones de entrada y salida para el modelo de lógica difusa	93
3-25	Función de membresía para la variable de entrada o condiciones de velocidad	94
3-26	Función de membresía para la variable de salida o condición del flujo	95
3-27	Curva de control difuso	96
3-28	Reglas de control difuso por el método de inferencia de Mandani	97
3-29	Simulación actual, Juárez Sur y Corregidora	98
3-30	Diagrama Espacio-Temporal actual del sentido O-E	101
3-31	Límites de equivalencia del Punto A y Punto B	104
3-32	Límites de equivalencia de la prueba cinemática	105
4-1	Comparación del volumen vehicular obtenido en la simulación y el modelo de estimación con lógica difusa	106
4-2	Diagrama Espacio-Temporal del sistema de semáforos coordinado en sentido Oeste-Este para una velocidad de 50km/h	111
4-3	Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones antes de la mejora, sentido Oriente-Poniente	112
4-4	Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones antes de la mejora, sentido Poniente-Oriente	113
4-5	Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones después de la mejora, sentido Oriente-Poniente	114
4-6	Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones después de la mejora, sentido Poniente-Oriente	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2-1	Tamaño mínimo de muestra para estudios de tiempos de recorrido y demora con un nivel de confianza del 95%.	33
2-2	Comparación de dispositivos GPS de navegación autónoma existentes	35
3-1	Distancia entre puntos de control	54
3-2	Volúmenes de tránsito vehicular mixto en la intersección Zaragoza-Ezequiel Montes	56
3-3	Recorridos preliminares en el circuito Zaragoza	58
3-4	Amplitud media de los recorridos preliminares en el circuito Zaragoza	59
3-5	Tamaño mínimo de muestra para estudios de tiempos de recorrido y demora con un nivel de confianza del 95%.	60
3-6	Indicadores estadísticos del punto A	65
3-7	Indicadores estadísticos del punto B	66
3-8	Indicadores de la diferencia pareada	67
3-9		70
3-10	Porcentajes de la composición vehicular del corredor Zaragoza	73
	Intervalo de cambio de fase	
3-11	Cálculo del ciclo óptimo	75
3-12	Distribución de frecuencias de la velocidad	80
3-13	Resultados del análisis de velocidad	82
3-14	Resultados del análisis de densidad	84
3-15	Datos de la intersección de estudio para el análisis de capacidad	88
3-16	Factor de ajuste por ancho de carril	89
3-17	Resultados de los factores de ajuste para el cálculo de la capacidad	91
3-18	Reglas de Fuzificación	95
3-19	Volúmenes horarios de las intersecciones	100
3-20	Cálculo del tiempo de desfase	102
4-1	Volumen vehicular generado con la simulación de las condiciones antes y despues	107
4-2	Densidad promedio generada con la simulación de las condiciones antes y despues	107

4-3	Tiempo de demora promedio generado con la simulación de las condiciones antes y despues	108
4-4	Tiempo de viaje promedio generado con la simulación de las condiciones antes y despues	109
4-5	Velocidad promedio generada con la simulación de las condiciones antes y despues	110
4-6	Comparación de la velocidad global y el tiempo de recorrido para la vialidad Zaragoza, en sentido Oriente-Poniente	115
4-7	Comparación de la velocidad global y el tiempo de recorrido para la vialidad Zaragoza, en sentido Poniente-Oriente	116

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación		Página
1	Relación de demora	18
2	Ecuación fundamental del flujo vehicular	20
3	Relación del flujo	21
4	Relación de la densidad	21
5	Modelo lineal de Greenshields (1935)	22
6	Velocidad media, modelo logarítmico de Greenberg (1959)	23
7	Flujo, modelo logarítmico de Greenberg (1959)	23
8	Velocidad media, modelo exponencial de Underwood (1961)	23
9	flujo, modelo exponencial de Underwood (1961)	23
10	Amplitud media de las velocidades de recorrido	32
11	Intervalo de cambio de fase	73
12	Longitud de ciclo	74
13	Tiempo total perdido por ciclo	74
14	Flujo de Automóviles Directos Equivalentes por hora	74
15	Factor de equivalencia por vehículos pesados	75
16	Tasa de flujo de saturación	87
17	Factor por vehículos pesados	90
18	Factor de ajuste por pendiente	90
19	Factor de ajuste por actividad de estacionamiento	90
20	Factor de ajuste por paradas de autobús	90
21	Capacidad	91
22	Tiempo de desfase	102

1. INTRODUCCIÓN

El congestionamiento de las vialidades urbanas se ha convertido en un tema de gran importancia debido al impacto que genera en nuestra vida diaria. Los efectos negativos que se presentan en las zonas urbanas se vuelven cada vez más notorios, esto se atribuye en gran parte a que el desarrollo de la economía de las ciudades genera que año tras año la cantidad de vehículos de motor aumente. Anteriormente, para dar solución al incremento de la demanda se solía recurrir a acciones como la construcción de nueva infraestructura o el aumento de la sección geométrica de las vialidades. Gao y Chabini (2006) reconocen que la construcción de más infraestructura, la cual está restringida política, financiera, y ambientalmente, no es el único remedio para el congestionamiento, ya que también es posible emplear estrategias de control de tránsito para lograr mejorar las condiciones actuales de servicio en los puntos donde existe algún conflicto vehicular.

Las innovaciones en los vehículos de transporte según Javed *et al.* (2019), se centran en la seguridad, potencia, economía y comodidad. De estas características nace el término de sistema inteligente de transporte, el cual se basa en un proceso de control en tiempo real bien diseñado y se le considera el cerebro del sistema. El secreto detrás de esto es precisamente la conectividad entre los vehículos y la infraestructura, esta relación busca generar conocimiento de las condiciones de tránsito en las vialidades.

Los avances en sistemas computacionales y cibernéticos de acuerdo con Chen *et al.* (2020), han generado una tendencia creciente en el diseño, desarrollo e implementación de sistemas que logren resolver problemas referidos a redes vehiculares. Pero esto no es tan sencillo, ya que el problema no solo consta del desequilibrio entre la oferta de infraestructura y la demanda generada por los usuarios, cuestiones como la mala planeación de desarrollo urbano, la limitación de recursos para implementación de nuevas tecnologías y la falta de estrategias

integrales que den solución a algunas problemáticas de movilidad, también son puntos importantes para lograr una correcta aplicación de nuevos sistemas.

Para generar estrategias que puedan dar solución a problemáticas de congestión en una serie de intersecciones semaforizadas en secuencia sucesiva, se presenta una alternativa de bajo costo de tecnologías aplicada al estudio del comportamiento del flujo vehicular con la finalidad de desarrollar planes semafóricos que mejoren la operación de un sistema de control de tránsito.

Para lograr determinar el mejoramiento del sistema de control del tránsito, se utilizarán las herramientas computacionales y tecnológicas basadas en la simulación de tránsito, de tal manera que sea evidente percibir las mejoras al realizar la modificación del sistema actual. Existen diversos *software* dedicados al análisis del comportamiento vehicular basados en el uso de modelos macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos, en este trabajo se opta por emplear el programa AIMSUN versión 7.0.4 (TSS – *Transport Simulation Systems*, 2013), desarrollado por la *Universitat Politècnica de Catalunya*.

El desarrollo de tecnologías de bajo costo, sumado a la aplicación de estrategias de monitoreo para realizar el mejoramiento de las condiciones del tránsito que aquí se presentan, pretenden que tal propuesta sirva como base para el desarrollo de proyectos integrales que contemplen estrategias de gran alcance para mejorar las condiciones de operación de las redes viales.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En las últimas décadas, el congestionamiento vial se ha posicionado como un problema grave que afecta la calidad de vida de las personas. La cantidad de vehículos que transitan en zonas urbanas ha aumentado de forma acelerada, en 1980 según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se contaba con

33,474 vehículos de motor registrados en circulación en la ciudad de Querétaro, mientras que en 2018 se alcanzó la cifra de 415,464 (INEGI, 2018). La tendencia de este incremento se ha reportado internacionalmente por Al-Mosaind (1998), Dinopoulou *et al.* (2006) y Shi y Abdel-Aty (2015). De acuerdo con el INEGI (2017), en un día entre semana se realizan 34.56 millones de viajes en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), de los cuales el 58.1 % son para ir al trabajo y su duración oscila entre media hora y dos horas.

Si bien el crecimiento acelerado del parque vehicular ocasiona congestión en las vialidades urbanas, existen algunos elementos en la infraestructura vial que propician desajustes en el sistema, generando mayor congestión, por lo que se deben tomar en cuenta al momento de realizar el análisis operativo de las redes viales. Los semáforos se han empleado desde hace muchos años para controlar el flujo de vehículos en las intersecciones regulando el paso de los mismos, sin embargo, el uso de dispositivos de control del tránsito también genera problemas como la disminución de la velocidad global y el aumento de los puntos en los que el vehículo permanece parado, causando así mayor tiempo de demora a lo largo de la ruta que debe recorrer el vehículo (Cabezas *et al.*, 2019).

El constante cambio en la velocidad de los vehículos a causa de las paradas repentinas que se presentan en las vialidades urbanas y sus intersecciones, trae como consecuencia grandes problemas para los usuarios. Uno de los principales problemas está referido al aumento de agentes contaminantes como la emisión de gases nocivos y altos niveles de ruido generados por los vehículos en condiciones de congestión.

La contaminación del aire causada por los vehículos de combustión interna representa un importante riesgo para la salud. De acuerdo con estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (2016), cada año la contaminación ambiental del aire causa 4.2 millones de muertes prematuras en todo el mundo, debido a la exposición de partículas nocivas que causan enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer.

Además de los gases nocivos que afectan directamente la salud física de las personas, los gastos para tratar enfermedades relacionadas con estas causas son una componente de los llamados costos marginales del tránsito, Bigazzi y Figliozzi (2013) nos indican que la exposición a la contaminación en periodos prolongados en condiciones de congestión, genera un costo extraordinario independiente de los costos de operación referidos a combustible, aceite y desgaste de las piezas del vehículo, y la estimación de los costos asociados al tiempo, los cuales ya han sido estudiados anteriormente por Torres-Vargas y Hernández-García (2006).

1.2 JUSTIFICACIÓN

Una de las soluciones a las que se solía recurrir para disminuir el efecto del congestión era precisamente ampliar la sección geométrica de las vialidades o simplemente crear nueva infraestructura, Gao y Chabini (2006), reconocen que la construcción de más infraestructura no es la única solución para el problema del congestión. El enfoque actual se ha centrado en maximizar el aprovechamiento de la infraestructura existente mediante la aplicación de estrategias de monitoreo y control del tránsito, logrando así una buena administración de la infraestructura vial.

En los últimos años ha incrementado la tendencia de aplicación de nuevas tecnologías para realizar el monitoreo y análisis del tránsito, tal es el caso de los vehículos instrumentados con Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés). Es el caso, por ejemplo de Yong-chuan *et al.* (2011), quien emplea la información GPS generada por 500 vehículos flotantes para estimar el nivel de congestión de una ciudad. Bellavista *et al.* (2014) afirma que, es posible lograr estimaciones del tránsito razonables con tasas de penetración limitadas de vehículos instrumentados con capacidades de vigilancia. Este mismo autor, indica

que eventualmente será posible emplear estos vehículos a nivel local para generar indicadores de monitoreo del tránsito concisos con la finalidad de optimizar la gestión del semáforo.

En la búsqueda de la reducción del congestionamiento y el aumento de la eficiencia de la movilidad urbana, se podrían emplear algunos vehículos instrumentados con capacidades de vigilancia del tránsito que sean aptos para generar indicadores de monitoreo concisos, de tal forma que la información se pueda emplear para lograr una mejor gestión de las intersecciones señalizadas con semáforos, en un periodo de tiempo corto y a un costo bajo.

1.3 OBJETIVO

Generar una relación entre los datos obtenidos con el vehículo flotante y el flujo vehicular al momento de la realización del estudio, de tal forma que se logre elaborar un modelo de estimación del tránsito y, basado en lo anterior, lograr un aumento de las velocidades promedio y una reducción en los tiempos de recorrido modificando el sistema de señales de control del tránsito en la zona de estudio.

1.4 HIPÓTESIS

Se logrará realizar un aumento del 10% de las velocidades promedio y reducir un 10% los tiempos de recorrido del tramo de estudio, modificando el plan semafórico de las intersecciones de la vialidad.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Congestionamiento e ingeniería de tránsito

De acuerdo con Taylor (1992), el congestionamiento del tránsito se define como un fenómeno en el cual se genera un aumento en la interrupción del movimiento del tránsito en un elemento determinado del sistema de transporte, originado por las interacciones que existen entre las unidades en el flujo vehicular. A este fenómeno se le asocia el incremento de demoras y longitud de colas, y se vuelve más visible cuando el nivel de la demanda se acerca o rebasa la capacidad del elemento.

Desde un punto de vista físico, el problema del comportamiento del flujo vehicular se ha investigado a partir de la década de 1990 como un sistema dinámico de partículas (vehículos) que interactúan en un medio (vialidades), Sugiyama *et al.* (2008) lo define como un sistema de partículas que no se encuentra en equilibrio ya que el efecto colectivo del sistema de partículas provoca la inestabilidad de un estado de flujo libre, llegando a un punto de congestionamiento causado por las constantes transiciones de bloqueo espontáneas que ocurren cuando la densidad promedio de los vehículos excede cierto valor crítico.

Las condiciones de inestabilidad en el sistema son causadas por el efecto del movimiento colectivo de los vehículos que interactúan en las vialidades, en los periodos de máxima demanda el movimiento del flujo vehicular suele perder su eficiencia, provocando reducciones en la velocidad y causando que el sistema tienda a saturarse. Las demoras que se presentan en zonas urbanas son ocasionadas de dos formas:

La primera está asociada a los sistemas de control de tránsito y se consideran tiempos de espera que se presentan de forma regular en los viajes urbanos.

El segundo caso está relacionado con los eventos que ocasionan el congestionamiento de forma periódica, es decir, que suceden a la misma hora del día y son generados por el aumento de la demanda por parte de los usuarios, y las no periódicas que se asocian a eventos extraordinarios tales como vehículos descompuestos o accidentes de tránsito en sus diversos grados de severidad, originando un bloqueo parcial o total de la vialidad. El cierre eventual de un carril o de la vialidad completa puede darse también por cuestiones de reparación y mantenimiento de la infraestructura. Las condiciones climáticas adversas como lluvias, neblina y viento intenso también ocasionan reducciones en la velocidad, lo que provoca que el sistema tienda a saturarse. Otra cuestión a considerar son los eventos deportivos y culturales, ya que, suelen ser grandes puntos atractores que causan la saturación de la infraestructura de las zonas adyacentes.

La influencia de todas estas demoras puede ser comparada mediante una relación de demora, tal como nos indica Taylor (1992), quien presenta un indicador de congestionamiento dado por la relación entre el tiempo total del viaje considerando en él los tiempos de demoras generadas en el recorrido y el tiempo hipotético de realizar el recorrido en condiciones de flujo libre, bajo el supuesto de que no se presenta ninguna condición de demora. Para representar lo anterior, se presenta la Ec. 1.

$$CI = \frac{(T-T_0)}{T_0} \quad \text{(Ec. 1)}$$

Donde:

T = tiempo de viaje considerando las demoras, y

T_0 = tiempo de viaje a flujo libre

Además de este indicador, se puede obtener también en términos de velocidad, considerando una relación entre la velocidad de recorrido, también conocida como velocidad global respecto de la velocidad a flujo libre, diversos autores presentan valores típicos mínimos de acuerdo con el tipo de vialidad que se está analizando:

Autopistas con acceso controlado: 56 km/h

Arterias principales: 40 km/h

Calles secundarias: 32 km/h

Los ingenieros de tránsito han demostrado que es posible emplear soluciones de bajo costo maximizando el aprovechando de la infraestructura existente. Regular el funcionamiento del tránsito se logra mediante una correcta administración de infraestructura, planificar estrategias integrales que puedan resolver no solo problemas aislados sino, maximizar el impacto positivo de tal forma que se logren realizar desplazamientos de manera segura, fluida, eficiente y con el menor impacto social y ambiental.

Para generar estrategias de largo alcance, se requiere de un constante monitoreo del tránsito, una de las bondades de implementar Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS, por sus siglas en inglés), es que pueden ser utilizados para analizar las intersecciones que trabajan bajo el esquema de señales de control del tránsito en las redes viales, ya que al conocer la calidad del movimiento vehicular en estos puntos, se puede mejorar la asignación del tiempo verde, logrando un aumento en la capacidad de la intersección.

La capacidad de un sistema, en general se define como el número máximo de entidades que pueden ser procesadas por unidad de tiempo, en términos de ingeniería de tránsito, se establece como el número máximo de peatones o vehículos que pueden atravesar un punto, una sección uniforme de un carril o una autopista durante un período de tiempo específico, acorde a las condiciones de tránsito, características físicas y de sus sistemas de control (Romana *et al.*, 2017).

Calidad o Nivel de Servicio (NS), para medir de forma cualitativa las condiciones operativas de cualquier punto o zona de interés, existen los niveles de servicio los cuales están determinados en función de la velocidad, los tiempos de viaje, libertad para ejecutar alguna maniobra, interrupciones como las paradas, tiempos de demora y la comodidad para circular. Se definen seis niveles de servicio de la A a la F, siendo A la condición más favorable para el usuario, es decir, la vialidad tiene un excelente nivel de servicio y la F como la peor condición, en la cual existe un gran nivel de saturación del sistema.

2.2 Parámetros del flujo vehicular

Mediante el análisis de los elementos del flujo vehicular, se describe la forma en que circulan los vehículos en cualquier tipo de vialidad, de tal manera que sea posible comprender el comportamiento y las características del tránsito analizado. De acuerdo con Barceló (2010), el desarrollo de modelos se ha clasificado mediante dos grupos, los modelos macroscópicos que están basados en los modelos de la hidrodinámica y relacionan las variables de flujo (q), velocidad (v) y densidad (k), estas variables tienen una correlación a la cual se le conoce como ecuación fundamental del flujo vehicular presentada a continuación en su forma general como la Ec. 2.

$$q = v * k \quad \text{(Ec. 2)}$$

El flujo (q), representa al número de vehículos (N) que pasan durante un periodo (T) o tiempo de intervalo específico sobre un punto o sección específica,

esto nos proporciona un método para cuantificar valores en términos de capacidad. Esta relación se muestra a continuación en la Ec. 3.

$$q = \frac{N}{T} \quad \text{(Ec. 3)}$$

La velocidad (v), es un parámetro importante que nos permite evaluar la calidad del movimiento vehicular en una vialidad, y se define como la distancia recorrida por unidad de tiempo, generalmente representada en km/h.

La densidad (k), es el número de vehículos o peatones (N), que ocupan una distancia específica (d) en un carril en un instante de tiempo dado y se representa con forma a la Ec. 4.

$$k = \frac{N}{d} \quad \text{(Ec. 4)}$$

Los modelos microscópicos del flujo vehicular están basados en la descripción del movimiento individual de cada vehículo que compone un sistema dinámico, estos modelos prácticamente están basados en el comportamiento del usuario y el sistema de aceleración y desaceleración del vehículo. Este tema se aborda más a fondo en la sección 2.6 de este documento, ya que la finalidad de este apartado es realizar una breve revisión literaria de los modelos macroscópicos propuestos por diversos autores a través de los años.

Volviendo a la relación entre las tres variables principales del flujo vehicular (flujo, velocidad y densidad), Reyes-Spíndola y Cárdenas (2007), mencionan que los esfuerzos por lograr relacionar las variables ya mencionadas, se basa en tres metodologías de aproximación para describir el fenómeno del tránsito. Los primeros

intentos se realizaron tomando datos para realizar un ajuste simple a curvas de regresión, la segunda está basada en métodos deductivos a partir de condiciones límite y la tercera, empleando analogías físicas. Todos ellos trabajan bajo el supuesto de que el movimiento es homogéneo y describen las características globales del flujo vehicular. A continuación se hace mención de algunos de estos modelos macroscópicos.

El modelo lineal fue presentado por Greenshields *et al.* (1935), quienes realizaron las primeras investigaciones del flujo vehicular proponiendo así, una relación lineal entre la velocidad y la densidad a partir de un ajuste de mínimos cuadrados. La ecuación resultante se presenta como la Ec. 5.

$$\bar{V}_e = V_i \left(\frac{V_i}{K_c} \right) K \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

V_e = velocidad media espacial (km/h)

K = densidad (veh/km/carril)

V_i = velocidad media a flujo libre (km/h)

K_c = densidad de congestionamiento (veh/km/h)

Posterior a esto, otros grupos de investigadores llegaron a la conclusión de que no siempre existe una buena correlación lineal entre las dos variables estudiadas en el modelo de Greenshields. Surgiendo así algunos modelos no lineales, los cuales toman más en cuenta la curvatura de los datos.

Greenberg (1959), basando sus supuestos en la analogía hidrodinámica presenta su modelo logarítmico que combina las ecuaciones de movimiento y continuidad para aplicarlas a flujos vehiculares. Dicho modelo da buenos resultados

para condiciones de congestionamiento, en su modelo considera la velocidad a flujo máximo (V_m) y se representa con las Ec. 6 y 7.

$$\bar{v}_e = V_m \ln \left(\frac{Kc}{K} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

$$q = V_m K \left(\frac{Kc}{K} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

Por otro lado Underwood (1961), quien se interesó más bien por el régimen de flujo libre, desarrolló un modelo exponencial para flujos no congestionados, expuestos en las Ec. 8 y 9.

$$\bar{v}_e = V_i e^{-K/K_m} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$q = V_i K e^{-K/K_m} \quad (\text{Ec. 9})$$

2.3 Lógica difusa

Por primera vez el concepto de conjunto difuso (*Fuzzy set*) fue introducido por Zadeh (1965), el autor define un conjunto difuso como una clase de objetos con un continuo grado de membresía. Tal conjunto se caracteriza por una función de inclusión (*membership function*) que asigna a cada objeto cierto grado de pertenencia que varía entre cero y uno. Las operaciones de conjuntos clásicos como la unión, intersección, complemento o un subconjunto, son aplicables a los conjuntos difusos

y algunas propiedades de operadores como la propiedad conmutativa, asociativa, distributiva, identidad y transitiva también son válidas para los conjuntos difusos.

Los sistemas difusos o borrosos se introducen para manejar conceptos ambiguos, vagos o imprecisos. Su estructura de análisis se asocia comúnmente a la manera en que las personas perciben el medio que los rodea. Cotidianamente se formulan ideas de manera ambigua y que dependen de quien percibe el suceso, por ejemplo cuando observamos un vehículo en movimiento o cuando sentimos el agua a diferentes temperaturas. En estos casos la lógica clásica dice que cualquier condición solo tiene dos posibilidades, es decir, el vehículo va rápido o lento y el agua esta fría o caliente. Los sistemas difusos llevan a cabo un tipo de razonamiento aproximado semejante al desarrollado por el cerebro, permitiendo dar cierto grado de pertenencia a cada fenómeno observado, podemos decir pues, que esto nos permite inferir que tan veloz se mueve el vehículo; ¿va muy lento?, lento, normal, rápido o muy rápido. En el caso del agua ocurre exactamente lo mismo, así que puede estar clasificada como muy fría, fría, templada, caliente y muy caliente (Matín del Brío *et al.*, 2002).

La teoría de conjuntos clásicos también denominados conjuntos certeros, está basada en los principios de la teoría de la lógica Booleana, donde un elemento es bi-valuado y solo tiene dos posibilidades, ser/no ser, sí/no, pertenece/no pertenece, verdadero/falso, ya que no permite valores intermedios (Medina, 2007), bajo estos conceptos, se han generalizado estas reglas clásicas como la base de nuestros sistemas digitales actuales.

En el caso de los conjuntos difusos, no existe la exclusión característica de los conjuntos certeros, es decir que todos los elementos sujetos de análisis tienen un cierto grado de pertenencia que oscila entre cero y uno en los diversos conjuntos, siendo uno el máximo grado de pertenencia. La lógica difusa está basada en la teoría de los conjuntos difusos y puede ser empleada para generar modelos o controladores capaces de convertir estrategias de control lingüística en una estrategia de control automatizado.

Para cada conjunto o subconjunto difuso se define una función de pertenencia $\mu_A(t)$, también denominada función de membresía o inclusión, que representa el grado en que la variable (t) pertenece a un subconjunto denotado por una etiqueta lingüística (A). Esta etiqueta es conocida como variable lingüística y es aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje natural pero que también se le pueden asignar valores numéricos. Existe una gran variedad de formas para poder representar diversas funciones de membresía, las más usuales son funciones triangulares, trapezoidales, curvas y singleton, en la Figura 2-1 se presentan algunas funciones de membresía trapezoidal y triangular.

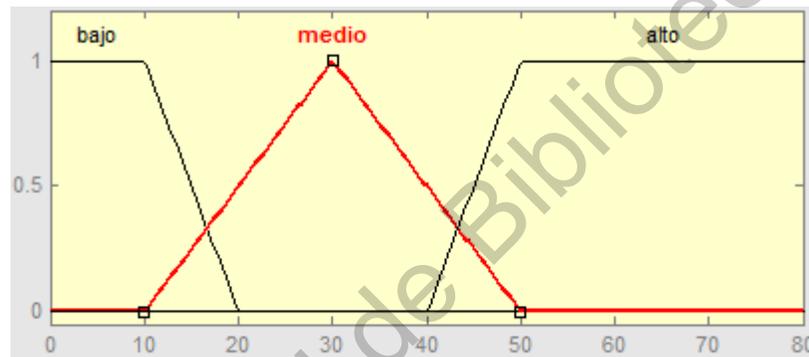


Figura 2-1. Función de membresía trapezoidal y triangular.

Fuente: Elaboración propia empleando el programa MATLAB.

Las reglas difusas de acuerdo con Matín del Brío y Sanz-Molina (2002), son proposiciones agrupadas que combinan una o más entradas y se les asocia un conjunto difuso de salida, para modelar el problema que se busca resolver se emplean las proposiciones *IF-THEN* y se asocian a las entradas mediante operaciones lógicas tales como *AND*, *OR*, entre otras. Aquí es donde se calibran las variables con el conocimiento experto de manera que se precise una serie de reglas que se agrupan para generar una base la cual determinará el comportamiento tanto de controladores como modelos difusos. Existen dos grupos de reglas que suelen emplearse comúnmente para crear modelos y controles difusos, las denominadas reglas de Mandani y las de Takagi-Sugeno.

A continuación se presenta en la Figura 2-2 un diagrama de flujo del proceso de inferencia difusa y se mencionan las características básicas de cada etapa.

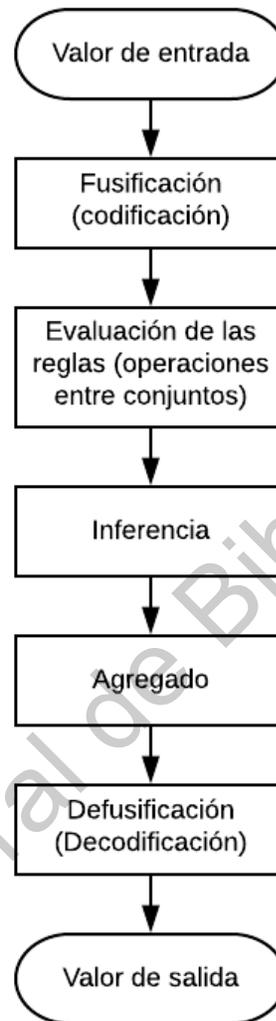


Figura 2-2. Etapas del proceso de inferencia difusa.

Fuente: Elaboración propia.

La fuzificación, codifica o traduce los valores de entrada a valores difusos, otorgando un grado de pertenencia para cada una de las funciones de membresía respecto del universo de discurso.

El periodo de evaluación de reglas, las cuales definen la estrategia de control que se llevará acabo realizando así operaciones entre conjuntos.

La inferencia, es la etapa en la que se determina el conjunto difuso de salida de cada regla.

Agregación, se refiere a la agrupación de los conjuntos difusos obtenidos al evaluar las reglas.

La defuzificación, se refiere al proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real.

Actualmente existen varios *software* de computadora especializados en el desarrollo de controladores difusos y que desarrollan las etapas de la inferencia difusa para resolver diversas problemáticas actuales. MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, FuzzyTech y Matemática Fuzzy Logic, por mencionar algunos de ellos.

Las ventajas de utilizar este tipo de modelos recaen en tres condiciones:

1. No requiere conocer el modelo matemático que describe la dinámica del modelo a controlar.
2. No requiere identificar el sistema.
3. No requiere de ninguna aproximación del modelo, ni linealizarlo.

La desventaja al emplear modelos y controladores difusos, es que se requiere de una base de reglas lingüísticas bien desarrolladas que describan lo que se pretende resolver, siempre de la mano de un experto que pueda calibrar los parámetros de entrada y salida del sistema.

A continuación, se presentan algunos casos donde la implementación de la lógica difusa ha generado buenos resultados en algunos problemas relacionados con el transporte, y se consideran implementaciones exitosas en el campo de la ciencia y la tecnología.

A principios del siglo XXI, Chou y Teng (2002) usaron la teoría difusa para implementar un controlador de señal de tránsito, el cual se basó en nueve reglas de control creadas en función de las características geométricas de las vialidades, Xirogiannis *et al.* (2004), propusieron un mapa cognitivo difuso, que se desarrolló

con un algoritmo que calcula y desarrolla una jerarquización de mapas de red para apoyar a expertos en la toma de decisiones en el área del diseño urbano. Murat y Gedizlioglu (2005), se enfocaron en desarrollar un modelo de control de señal multi fase de lógica difusa para intersecciones aisladas, el modelo se compone de dos sistemas, uno organiza la duración de la fase verde y el otro sistema se ocupa de las otras fases utilizando volúmenes de tránsito. Un año más tarde, Murat (2006), empleó un enfoque difuso y otro enfoque basado en redes neuronales para estimar las demoras de los vehículos en intersecciones en condiciones de saturación.

Saltan *et al.* (2007), generaron un modelo difuso para analizar los datos obtenidos de pruebas no destructivas de capacidad estructural de un pavimento flexible, la ventaja de implementar este modelo respecto del uso del elemento finito es la velocidad de procesamiento de la información. Li *et al.* (2008) y Dimitriou *et al.* (2008), abrieron una brecha en el área del monitoreo del tránsito ya que el primer autor propone un modelo de estimación del tránsito con un enfoque neuro-difuso basado en información GPS de 5000 taxis que circulan en la ciudad de Guangzhou y el segundo autor, propuso un sistema neuro-difuso para estimar el tránsito vehicular a corto plazo en una red urbana. Ambos logran estimar el estado del tránsito ya no con el método tradicional de conteo de vehículos, sino que se basan solo en el muestreo obtenido por información de vehículos sonda con sistemas GPS.

Los algoritmos de enrutamiento de vehículos han buscado la manera más óptima y precisa para responder a las necesidades de los usuarios en entornos urbanos, Ghatee y Hashemi (2009) propusieron un modelo de asistencia técnica empleando la teoría de los conjuntos difusos en la que los costos de viaje están basados en los niveles de congestión. Los diagnósticos para establecer cuellos de botella suelen verse influenciados por mediciones poco confiables y criterios subjetivos de los analistas, por tal razón Liu y Fei (2010), emplearon la lógica difusa para proponer un diagnóstico que analiza cuellos de botella empleando una red de sensores en zonas urbanas. Taha y Ibrahim (2012), se percataron de

que si bien existen entornos de simulación de tránsito y entornos para resolver problemas con lógica difusa, no existía un entorno de desarrollo para ambas herramientas, así que ellos lo hicieron posible al crear un entorno de simulación diseñado para probar y evaluar cualquier sistema de gestión de tránsito que implemente la lógica difusa.

Uno de los primeros sistemas adaptativos de tiempo real basados en la lógica difusa fue presentado por Kammoun *et al.* (2014), la lógica difusa también es una herramienta que ha traído buenos resultados en el área de sistemas de conducción inteligentes, Cuervo-Pinilla *et al.* (2014) basado en la teoría difusa, implementó un sistema de conducción inteligente, el cual fue puesto a prueba en un entorno real en varias avenidas de análisis, el sistema accionado en tiempo real reaccionó de una forma prometedora. Collotta *et al.* (2015), empleó sensores para encargarse de la gestión dinámica de los semáforos empleando controladores difusos. Kong *et al.* (2016), emplearon un método de evaluación integral difuso para estimar el nivel de congestamiento en tiempo real, basado en las trayectorias de los vehículos instrumentados con GPS. El mismo año Najafi *et al.* (2016), considerando como prioridad la seguridad del vehículo, desarrollaron un sistema de advertencia de los niveles de fricción entre la superficie de rodadura y los neumáticos por medio de la inferencia de lógica difusa.

En los últimos años los investigadores han implementado la teoría de la lógica difusa a soluciones relacionadas con problemas de aplicación en tiempo real, Hatri y Boumhidi (2018) propusieron un método basado en el aprendizaje profundo difuso para mejorar la detección de incidentes en tiempo real en una red vial, Chatterjee *et al.* (2019), buscaron reducir el tiempo de espera en intersecciones con sistemas de control de tránsito, creando un modelo basado en reglas de lógica difusa Tipo 2, que busca ser implementado como aplicación de enrutamiento de vehículos. Hou *et al.* (2019), combinaron dos modelos de estimación de tránsito, el método lineal de la media móvil integrada auto regresiva (ARIMA, por sus siglas en inglés) y la red neuronal wavelet no lineal (WNN, por sus siglas en inglés) generando

así un modelo de lógica difusa para estimar el volumen del tránsito en el corto plazo. Para mejorar la seguridad peatonal, AlKheder y AlRukaibi (2020) propusieron un sistema adaptativo de semáforos basado en lógica difusa, las reglas y el código del sistema adaptativo fue generado en MATLAB dando prioridad a los peatones y se analizó en el *software* Synchro. Finalmente, una de las implementaciones tecnológicas a las que muchas empresas automotrices han apostado, es al estudio de los vehículos eléctricos, Çeven *et al.* (2020), estimaron el alcance de la batería de un vehículo eléctrico basado en un clasificador de lógica difusa del tipo Mandani.

2.4 Metodología del vehículo flotante

La velocidad es un parámetro que nos permite evaluar la eficiencia operativa de las redes vialidades. El estudio para determinar los tiempos de recorrido y demoras se emplea para evaluar la calidad del movimiento del tránsito a lo largo de un segmento, circuito o área determinada. Podemos realizar una identificación de los puntos de conflicto, es decir, determinar donde se generan tiempo de retardo o demora en que los vehículos permanecen parados, estos datos ayudan a los analistas a ubicar las zonas donde se deben realizar mejoras de diseño y operación para incrementar la movilidad y seguridad de los puntos donde existe algún conflicto (Steel Davies Gleave *et al.* 2006).

La velocidad de recorrido o velocidad global es la distancia recorrida entre el tiempo total que tarda el vehículo en recorrer tal distancia, mientras que la velocidad de marcha esta dada por la distancia recorrida entre el tiempo en que el vehículo permaneció en movimiento, por lo cual, es necesario restar los tiempos de demora del tiempo total del recorrido para determinar este parámetro.

Las demoras se refieren a los tiempos en que el vehículo permanece parado en el tránsito y puede ser causado por congestionamiento de la vialidad o por la

existencia de sistemas de control del tránsito en las vialidades del circuito de análisis, lo anterior se mencionó de forma más específica en el punto 2.1. Se miden en unidades de tiempo, generalmente en segundos (s) y se debe tomar nota de la ubicación, la causa y la frecuencia con que se presentan. A continuación, se trata de manera concisa la metodología para la obtención de los tiempos de recorrido y demoras.

El método del vehículo flotante, también denominado vehículo de prueba o instrumentado cuando se equipa con algunos dispositivos de monitoreo como cámaras o equipos GPS, consiste en cronometrar el tiempo de recorrido y registrar las demoras (Torres-Vargas y Pérez-Sánchez, 2002).

Para recabar la información de campo empleando este método, el vehículo debe ser tripulado por dos personas para la ejecución del estudio, el primero debe ser un conductor experimentado que conozca la ruta que previamente se trazó para realizar los recorridos, mientras que la otra persona será la encargada de tomar nota empleando un par de cronómetros y hojas de registro, apuntando el tiempo transcurrido entre cada punto de control, además de indicar la localización, la causa y el tiempo en que el vehículo permaneció parado(tiempos de demora). Cuando se trate de un vehículo instrumentado con un dispositivo colector de datos GPS, el equipo será el encargado de registrar de forma automática los parámetros generados en el recorrido.

Se debe realizar el recorrido de la ruta establecida partiendo del punto inicial del itinerario, justo en ese instante, el conductor debe elegir de forma aleatoria un vehículo que se encuentre dentro del flujo para comenzar una persecución a través de la vialidad, buscando replicar las condiciones en las que opera el vehículo observado, quien en todo momento no debe percatarse de que está siendo sujeto de observación. En caso de que el vehículo observado se desincorpore de la ruta establecida, el conductor inmediatamente deberá elegir de forma aleatoria otro vehículo del flujo y continuar con la persecución hasta llegar al punto final del itinerario. Además de la técnica de persecución, la Secretaría de Desarrollo Social

(SEDESOL, 2005) presenta consideraciones complementarias para realizar correctamente los recorridos, las cuales se muestran a continuación:

- El vehículo debe circular a una velocidad “promedio” representativa de la flota de vehículos con los que transita, buscando el rebase de tantos vehículos como lo rebasen a él.
- El conductor debe viajar de acuerdo a su apreciación de la velocidad predominante del flujo del tránsito.
- Una técnica que no es tan comúnmente utilizada es la del vehículo máximo, en esta técnica el vehículo debe viajar al límite de velocidad de la vía en particular, a menos que las condiciones del tránsito no lo permitan.

. El tamaño de la muestra se refiere al número mínimo de veces que se debe recorrer la ruta o circuito, y de acuerdo con Box y Oppenlander (1985) depende del error tolerable de la media de las velocidades de recorrido estimado y de la variabilidad o dispersión de las observaciones.

El autor sugiere algunos rangos para el error permitidos en el estimado de la velocidad media de acuerdo al tipo de estudio que se quiere abordar:

- Estudios de planeación: ± 5.0 a 8.0 km/h.
- Análisis de circulación y evaluaciones económicas: ± 3.5 a 6.5 km/h.
- Estudios de antes y después: ± 2.0 a 5.0 km/h.

Para determinar una medida de la variabilidad entre los recorridos, el mismo autor propone determinar la amplitud media de las velocidades de recorrido que se calcula por medio de la Ec. 10, que se muestra a continuación.

$$R = \frac{\sum_{i=2}^n |V_i - V_{i-1}|}{n-1} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

R : Rango promedio de la velocidad del recorrido (km/h).

$\sum |V_i - V_{i-1}|$: Suma de los valores de todas las diferencias de velocidades entre cada viaje.

V_i : Velocidad asociada al tiempo de viaje (km/h).

n : Número de recorridos de prueba completos.

Ya que se estimó la amplitud media de las velocidades de recorrido y se selecciona el error máximo tolerable de la media de las velocidades, se emplea la Tabla 2-1 presentada por Box y Oppenlander para determinar el número mínimo de recorridos para un nivel de confianza del 95%.

Tabla 2-1. Tamaño mínimo de muestra para estudios de tiempos de recorrido y demora con un nivel de confianza del 95%.

Amplitud media de la velocidad de recorrido (km/h)	Número mínimo de recorridos para un error tolerable específico (km/h)				
	± 2.0	± 3.5	± 5.0	± 6.5	± 8.0
5.0	4	3	2	2	2
10.0	8	4	3	3	2
15.0	14	7	5	3	3
20.0	21	9	6	5	4
25.0	28	13	8	6	5
30.0	38	16	10	7	6

Fuente: Box y Oppenlander (1985).

La variabilidad de las observaciones para los estudios en vialidades urbanas puede ser muy grande, esto se debe a que en este entorno existe una gran cantidad de intersecciones que cuentan con dispositivos de control del tránsito, influyendo en gran medida en el tiempo total del recorrido, especialmente cuando el sistema está mal coordinado. En este estudio el tiempo en el que el vehículo permanece parado en el tránsito es un factor preponderante del tiempo total del recorrido, por lo cual es crucial tomarlo en cuenta en la obtención del número mínimo de muestras.

2.5 Implementación de un dispositivo colector de datos GPS

En los últimos años ha incrementado la tendencia de aplicación de nuevas tecnologías para realizar el monitoreo del tránsito. Desde su aparición, y gracias a su desarrollo, los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) han sido empleados para una gran cantidad de propósitos ya que permiten estimar la ubicación geográfica de cualquier objeto mediante señales emitidas por satélites, lo anterior ocasionó un cambio sin precedentes en la forma en que se generan y analizan las bases de datos relacionadas con la movilidad de las personas y el transporte de mercancías (Casadei *et al.*, 2018).

Los sistemas actuales para la recolección de datos utilizan diversos equipos para asegurar la confiabilidad y eficiencia al llevar a cabo estudios viales. Existen diversos servicios de localización desarrollados por países como China, India y algunos países europeos (Kaplan y Hegarty, 2005). Todos los servidores vigentes han dado buenos resultados, sin embargo, en un análisis realizado por ÖZDEMİR y TUĞRUL (2019), determinaron que el número de satélites que se encuentran sincronizados con el receptor influyen en la precisión del cálculo de la posición del dispositivo, pero el rendimiento se ve afectado considerablemente por las siguientes cuatro variables:

Precisión: el cálculo de la distancia y la velocidad en un punto se ven afectadas por el lapso de tiempo entre la posición medida y la posición real.

Integridad: es necesario que el dispositivo proporcione información bajo circunstancias no esperadas o poco fortuitas.

Continuidad: El dispositivo debe generar información sin interrupción.

Disponibilidad: El dispositivo cuenta con la señal de recepción mínima necesaria para realizar la sincronización.

Actualmente en el mercado existen diversos dispositivos que nos permiten generar el seguimiento por medio de satélites, el rango de costos por adquisición, operación y mantenimiento es sumamente variado y estará asociado directamente a los componentes con los que trabaja el dispositivo para obtener el nivel de precisión que se pretenda lograr (Thomas *et al.*, 2011). A continuación, se presenta la Tabla 2.2 mediante la cual se expone la comparación de los diversos equipos GPS de navegación autónoma que existen actualmente en el mercado.

Tabla 2-2. Comparación de dispositivos GPS de navegación autónoma existentes.

Tipo de dispositivo	Dimensiones (mm)	Batería	Tiempo de posicionamiento (s) y precisión (m)	Sistema de tiempo real	Interfaz de usuario	Forma de almacenamiento	Precio comercial (MXN)
Gama Baja	46 X 64 X 17	Recargable 3.7V 800 mAh, rinde hasta 4 días	Hasta 25, 5	No	LED	No almacena información, únicamente envía sus coordenadas de localización empleando un chip telefónico cuando se le solicita vía mensaje de texto.	300-600
Dispositivo Propuesto	57 X 110 X 50	AA (X4) 1.5V 2700 mAh, hasta 24 horas	1, 5	No	LED y pantalla LCD 16X2	Genera un archivo de base de datos que se almacena en una tarjeta MicroSD.	450-1200
Gama media	45 X 90 X 14	Recargable 5000 mAh,	Hasta 30, 10	Sí, con retraso de 30 segundos	LED	Genera una base de datos en la red. Este dispositivo requiere de un chip telefónico.	600-1500

Gama Alta	61 X 160 X 36	AA (X2) 1.5V 2700 mAh, hasta 16 horas	1, 3.65	Sí, con tiempo de retraso no especificado	Display con mapa mundial base	El dispositivo almacena archivos en su memoria. El registro se genera en modo automático ajustable a intervalos de tiempo o distancia. Algunos de estos dispositivos solo permiten generar un máximo de 500 puntos por archivo.	2200- 12000
-----------	------------------	--	---------	--	---	--	----------------

Fuente: Elaboración propia.

La tecnología de comunicación entre vehículo-infraestructura, busca plantear estrategias de gran cobertura, alta precisión y baja inversión, es así que el sistema de vehículo instrumentado se ha convertido en un método atractivo para recopilar datos del tránsito. El principio está basado en que los automóviles equipados con dispositivos GPS recopilan datos de posición, velocidad y tiempo, para posteriormente obtener información del estado del tránsito mediante el procesamiento de los datos obtenidos en campo (Wang, 2012). Actualmente, una gran cantidad de vehículos en muchas ciudades cuentan con dispositivos GPS, tal es así que Herrera *et al.* (2010) utilizaron detectores de teléfonos móviles para obtener el registro de velocidad y posición, con el cual concluye que es suficiente del 2 al 3 % de la población para estimar velocidades precisas del flujo vehicular, posteriormente Zhang *et al.* (2011) emplearon los datos GPS de 500 vehículos flotantes para estimar el congestionamiento del tránsito en una red urbana.

Algunos autores en años recientes han propuesto métodos basados en el uso de tecnologías GPS. Sun y Ban (2018), proponen un clasificador de vehículos utilizando los datos extraídos de sensores de tránsito móviles, con la información se determina una relación entre las características de los vehículos y las variaciones entre la aceleración y desaceleración. De acuerdo con Patire *et al.* (2015), es posible obtener velocidades de punto de los vehículos empleando dispositivos móviles, Ge y Fukuda (2016) proponen emplear las trayectorias individuales obtenidas de

dispositivos móviles para generar una matriz Origen-Destino (OD). Finalmente, Asakura *et al.* (2017), proponen un método de detección de incidentes utilizando los datos obtenidos por vehículos flotantes instrumentados con equipos GPS.

Años atrás, autores como Vega-González (2005) y Sifakis (2011) sustentaban que el desarrollo tecnológico sería el propulsor que daría lugar a sistemas muy sofisticados con el fin de mejorar el nivel de vida de los individuos. Los avances en sistemas computacionales y cibernéticos según Chen *et al.* (2020), han generado un gran interés en su implementación para resolver problemas referidos a redes viales y su aplicación en los sistemas de transporte. El enfoque de diseño y desarrollo de aplicaciones computacionales y tecnológicas que mejoren las condiciones del flujo vehicular se ha vuelto un gran campo de estudio.

2.5.1 De la programación de un dispositivo colector de datos

ARDUINO es una plataforma electrónica de código abierto basada en *hardware* y *software*. Las placas ARDUINO pueden leer entradas del medio que los rodea a las cuales denominamos sensores y convertirlas en salidas las cuales conocemos como actuadores. Utiliza lenguaje de programación basado en el procesamiento para realizar la comunicación de la tarjeta e indicar el conjunto instrucciones que debe ejecutar el microcontrolador, (ARDUINO, 2019).

El microcontrolador es denominado el cerebro del sistema, este recibe señales de 0 a 5 volts ya sea en el canal digital el cual únicamente emplea un código binario para activar o desactivar componentes o tareas y el denominado canal analógico que funciona como un escalonamiento de la señal de voltaje recibida en el rango de voltaje antes mencionado. El lenguaje de programación nativo del programa es C++ que permite la manipulación de objetos.

De acuerdo con Ceballos (2010), la programación orientada a objetos (POO), es un modelo de programación que utiliza atributos denominados objetos, dichos objetos son ligados por medio de mensajes para dar solución a problemas. Las características principales de la POO son:

Abstracción: se refiere a que generaliza el proceso para poder concebir una visión más global del problema de tal forma que vuelve más eficientes las operaciones debido a que no es necesario detenerse en detalles concretos que no sean de interés en el instante en que se procesa la información.

Encapsulamiento: nos permite reunir todos los elementos o información que residen en un objeto, de tal forma que solo se pueda cambiar mediante instrucciones que sean definidas para el caso específico y así poder manipular los objetos como unidades básicas.

Herencia: es la reutilización de código por así decirlo, de tal manera que si se define una clase y después se emplea una sub-clase de este, dicha sub-clase permite el acceso automático a la información contenida adquiriendo sus atributos y métodos, abriéndose la posibilidad de generar nuevos atributos. Esta característica nos permite implementar múltiples formas de aplicación de un mismo método.

En el área de la programación, existen elementos que simplifican algunos procesos, tal es el caso de las rutinas y sub-rutinas que facilitan la ejecución de funciones que se encuentran relacionadas entre sí. Las librerías de *software* funcionan como fuentes de información aplicables al código, mediante ellas podemos llamar funciones que incluyen de forma sencilla ciertas acciones específicas y en ocasiones complejas.

Podemos dividir en tres categorías las librerías existentes para el entorno de programación ARDUINO, la primera denominada *core*, que forma parte del entorno de desarrollo integrado (IDE, por sus siglas en inglés) y su función principal es la de simplificar algunos pasos que reducen la complejidad que implica trabajar con

microprocesadores tradicionales. Las segundas son denominadas librerías standard las cuales ya se encuentran incluidas en el entorno de programación del *software* y dichas funciones se consideraron básicas por parte del equipo de la plataforma para satisfacer las necesidades de aplicación para la mayoría de los usuarios, entre estas destaca las librerías *SD* y *LiquidCrystal*. Finalmente, las librerías conocidas como *contributed* que hace referencia a las aplicaciones generadas por los usuarios de la plataforma y que su escritura está sujeta a evolución y mejora.

2.6 Simulación del tránsito

Desde hace ya más de medio siglo los planificadores de transporte han empleado modelos de asignación de tránsito. En la búsqueda por representar las condiciones reales del comportamiento de los flujos vehiculares en las redes viales, nace la simulación del tránsito. Uno de los primeros modelos fue INTEGRATION, desarrollado por Michel Van Aerde en la Universidad de Waterloo, Canadá en 1984; la empresa Planung Transport Verkehr AG originaria de Karlsruhe, Alemania, presenta de forma comercial VISSIM en el año de 1992, seis años más tarde la Universidad de Florida desarrolló CORSIM y por parte del Instituto de Investigación del Transporte que pertenece al Centro Espacial Alemán se desarrolló la propuesta denominada SUMO en 2001.

La simulación está basada en la teoría de la dinámica de sistemas, una de sus características fundamentales es que existe una realimentación de información, de tal forma que, cuando se actúa sobre un sistema, se genera información de manera continua a partir de los resultados de las decisiones tomadas. Harrell y Tumay (1997), definen la simulación como un medio que experimenta con un modelo detallado que pretende imitar el comportamiento del sistema real, de tal

forma que este pueda determinar cómo se comportará al someterse a cualquier cambio de estructura o entorno.

En lo que compete a la simulación del tránsito, los planificadores de infraestructura han empleado esta herramienta para realizar simulaciones que permitan analizar estados del tránsito actuales para determinar resultados relacionados con los tiempos de viaje, el congestionamiento, niveles de contaminación y consumo energético (Astarita y Giofré, 2019). Otra aplicación de esta herramienta que se ha vuelto fundamental para los analistas del transporte es la de someter a cambios el sistema para comprender cómo podría afectar la realización de ciertas modificaciones y prever los impactos futuros en el desarrollo del transporte (Calvert y Arem, 2020).

Actualmente existen programas muy completos con sistemas robustos y flexibles capaces no solo de analizar sistemas de las condiciones de movilidad, sino que también se están integrando simuladores de red capaces de proporcionar herramientas para estudiar las comunicaciones *Vehicle to Everything* (V2X) (Piórkowski *et al.*, 2008). El simulador híbrido TraNS fue desarrollado por la Escuela Politécnica Federal de Lausana en Suiza, VEINS es la propuesta de la Universidad de Erlangen-Nuremberg en Alemania cuyo inicio data del año 2008, finalmente el programa con el que se realizará esta investigación; Aimsun fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña a principios de los años 90's.

Aimsun (2017) es un *software* que integra componentes microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos, trabaja con técnicas de equilibrio y asignación tanto dinámica como estática y modelos de elección estocásticos, permitiendo así, generar las simulaciones dinámicas. A continuación, se describe de forma breve las condiciones de análisis que representa cada uno de los componentes previamente nombrados.

Barceló (2010) expone en su libro que los modelos macroscópicos generalmente están basados en la teoría del flujo continuo, algunos investigadores

han empleado modelos de hidrodinámica para representar condiciones análogas en los flujos vehiculares considerando las variables de *Volumen, densidad y velocidad*.

Los modelos microscópicos de tránsito están basados en el comportamiento individual de cada partícula (el vehículo) que interactúa en un entorno dinámico (el tránsito), dicho comportamiento está representado por tres modelos matemáticos en los que está basado el sistema para imitar de forma precisa las interacciones entre los vehículos e infraestructura. A continuación, se presentan los modelos con los que opera el *software* de simulación a nivel microscópico:

- Si es necesario que un vehículo cambie de carril, entonces se aplica el modelo de cambio de carril (*Lane-Changing*).
- Si un vehículo se aproxima a una zona de conflicto, se aplica el modelo de aceptación de espacio (*Gap-acceptance*).
- Si simplemente el vehículo debe continuar transitando por el mismo carril, entonces se continúa trabajando con el modelo de seguimiento de vehículos (*Car-Following*).

Los modelos mesoscópicos representan una clasificación intermedia que combina aspectos microscópicos y macroscópicos. Además de emplear la elección de ruta estocástica y la asignación dinámica de tránsito, también trabaja con equilibrio dinámico del usuario. Los modelos mesoscópicos nos permiten discretizar el espacio y calcular el tiempo en el que un vehículo entra o sale de un carril, a diferencia de los modelos microscópicos que discretizan el tiempo y calculan la posición de los vehículos en intervalos cortos de tiempo.

Para poder realizar proyectos de análisis confiables, es necesario que el modelo represente de manera fidedigna las condiciones en las que opera la red o intersección que se pretende estudiar. Para esto, se requiere que el modelo sea calibrado y validado de tal forma que se acepte que el modelo es representativo de la red y del comportamiento de los vehículos individuales. Los parámetros que requieren de calibración y validación, se refieren a todos aquellos elementos que

componen el modelo y que representan las funciones particulares de cada elemento:

- La red de tránsito. Se refiere a las vialidades e intersecciones que representan correctamente las características geométricas de la zona de estudio.
- Demanda del tránsito. Para representar el movimiento de los vehículos en las vialidades, existen dos formas para implementarlas en el simulador, la primera es cargando una matriz Origen-Destino (OD), la segunda forma de cargar los datos es mediante estados de tráfico, indicándole al *software* el número de vehículos entrantes y salientes entre cada vialidad e intersección, indicando el porcentaje de vehículos que toma cada movimiento direccional.
- Transporte público. Se carga el Plan Maestro de Transporte Público, en él se tiene la información referida a las rutas de transporte público y los horarios en que transitan por la zona de análisis.
- Control de tránsito. Se trabaja con el Plan de Semaforización para las intersecciones, para que la simulación cuente con los tiempos y reglas que rigen las intersecciones.

Aimsun también permite emplear la programación utilizando lenguaje C++ mediante la cual podemos realizar diversas adecuaciones muy específicas de cada problemática que se pretende abordar, de tal forma que sea posible modificar parámetros del modelo, emplear Aplicaciones de Programación de Interfaz (API) que permita incluir Sistemas Inteligentes de Transporte (*ITS*, por sus siglas en inglés), aplicar modelos de comportamiento de usuario distintos de los que contempla el programa, y por último, crear aplicaciones totalmente nuevas para trabajar temas específicos que sean de interés para el analista.

2.6.1 De la implementación en los sistemas de control del tránsito

Los sistemas de control del tránsito afectan diariamente los recorridos que deben realizar los usuarios en la infraestructura vial, incluso cuando las redes viales no se encuentran saturadas, las paradas en la ruta de los vehículos suelen generar tiempos de espera en las intersecciones. Los peatones esperan que la señal interrumpa el flujo para poder cruzar la vialidad de forma segura de un extremo a otro y así continuar rumbo a su destino. Los conductores confían su seguridad a estos dispositivos que ceden el paso de manera ordenada a los vehículos, esto se logra gracias a la rutina con que están programados, dando un tiempo para que los vehículos avancen en cada fase correspondiente al ciclo semafórico de cada intersección, buscando la reducción de accidentes en las intersecciones.

La nomenclatura de color que debe cumplir cualquier sistema de control de tránsito es la siguiente:

- Rojo fijo: indica que los vehículos se detendrán completamente ante la raya de parada.
- Ámbar fijo: alerta a los usuarios que el paso vehicular está por concluir, indicando que está a punto de aparecer la luz roja y que el flujo vehicular debe detenerse.
- Verde fijo: los conductores tienen el paso para realizar los movimientos permitidos, ya sea ir de frente, dar vuelta izquierda o derecha, a menos que exista la señal que restrinja estos movimientos.
- Rojo intermitente: cuando la luz roja se encienda de manera intermitente los conductores deben realizar un alto obligatorio antes de la línea de parada.
- Ámbar intermitente: los usuarios podrán realizar el cruce con precaución.
- Verde intermitente: cuando la luz verde cambia de manera intermitente indica a los usuarios que se acerca el fin del tiempo de luz verde.

Los usuarios suelen asumir que mientras el dispositivo cumpla con su ciclo semafórico y realice correctamente los cambios de color verde-ámbar-rojo no existirá falla en el sistema, sin embargo, la mala administración de los sistemas de señales de tránsito y las ineficiencias del sistema suelen traducirse en pérdidas para los conductores al realizar un mayor gasto de combustible y tiempos de viaje más largo. Algunos autores han demostrado que un sistema de señal de tránsito eficiente reduce las demoras, las paradas, el gasto de combustible, las emisiones de contaminantes y los accidentes en las intersecciones.

Para lograr realizar un mejoramiento en el sistema de control de la señal de tránsito, es necesario delimitar los alcances que tendrá el proyecto, estos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Intersección aislada, hace referencia al cruce de dos o más caminos en un único punto sin considerar intersecciones adyacentes.
- Control para dos intersecciones, en el que se realiza un análisis de dos intersecciones consecutivas que se encuentren influenciadas una a la otra.
- Control de una red abierta, proporciona el control del flujo vehicular progresivo en una arteria principal, de tal forma que se logra la coordinación de intersecciones sucesivas de las señales de tránsito.
- Control de red, además de realizar la coordinación de intersecciones sucesivas, también efectúa la coordinación de un grupo de señales adyacentes dentro de un área determinada.

El mejoramiento de los planes de temporización de la señal de tránsito suele ser un trabajo intensivo y muy costoso, además, existen varios sistemas que emplean tecnología sofisticada que dan buenos resultados al ser implementados, pero no suelen ser opción para países en vías de desarrollo debido a que su instalación y operación son muy costosas. Tal es el caso de los sistemas adaptativos que tienen la capacidad de cambiar automáticamente el plan semafórico de acuerdo con los parámetros considerados en el algoritmo de operación y los

sensores que registran las condiciones del flujo en la intersección (Asocites Dunn Engineering y Systems Siemens Intelligent Transportation, 2005).

Existen 3 tipos de Factores que determinan la selección del tipo sistema de control del tránsito:

- Factores del tránsito, se refiere a las características de la demanda, es decir, el tipo de vehículo que transita por esa esa intersección, el volumen de vehículos y la variación horaria.
- Factores Físicos, que son aquellos elementos de la infraestructura que existen en la intersección, como la geometría del sitio, la sección transversal, obstáculos entre otros.
- Factores económicos, estos suelen ser a los que se les da mayor peso, ya que se considera el costo inicial de implementar cualquier tipo de dispositivo deseado, además se deben considerar los costos de instalación, costos por mantenimiento y operación en su periodo de vida útil.

Los primeros algoritmos de tiempo fijo datan de inicio del siglo XIX y se han implementado en los sistemas de control del tránsito desde entonces, todo esto ha evolucionado a través de los años de la mano del desarrollo de las características de los vehículos que se han utilizado en cada época. La tasa creciente en la demanda de vehículos de motor, generó también sistemas de señal de tránsito más sofisticados que exigían personal capaz de realizar cada vez análisis más complejo en las vialidades urbanas. Webster (1958) se encargó de desarrollar los primeros algoritmos de tiempo fijo, determinando el tiempo de señal óptimo incluyendo la longitud de ciclo semafórico, de tal forma que logra suavizar la longitud de colas a velocidad más o menos constante.

No es hasta la década de 1970, cuando se desarrollaron algunos paquetes de *software* especializados, los cuales ya contaban con modelos de tránsito capaces de ser empleados en ordenadores digitales asistidos por

microcontroladores. En Gran Bretaña, el centro de investigación denominado *Transport and Road Research Laboratory (TRRL)* creó un avanzado sistema de tránsito denominado *Split, Cycle and Offset Optimization Technique (SCOOT)*. Otro Sistema avanzado fue desarrollado en Australia el cual fue denominado *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS)*. Estos dos sistemas fueron los primeros en implementar técnicas de control adaptativo.

Los sistemas adaptativos suelen ser más eficientes en condiciones donde el flujo vehicular trabaja de forma considerablemente irregular, estos sistemas de control del tránsito también conocidos como sistemas accionados, requieren de detectores o sensores, los cuales registran y transmiten ya sea de forma alámbrica o inalámbrica, información de las condiciones que se presentan en el flujo vehicular. Parámetros tales como la velocidad, la longitud de colas y la cantidad de vehículos están ligadas a un algoritmo de optimización que permita ceder el paso a los usuarios de forma ordenada en una intersección. A continuación, se mencionan algunos de los sensores existentes en el mercado actual:

- Detectores de ciclo de inducción, registran mediante un campo electromagnético generado por estos dispositivos, la entrada de los vehículos obteniendo datos de conteo, presencia, velocidad y en algunos casos especiales clasificación vehicular.
- Placas de inducción magnética, detectan el paso de los vehículos que circulan sobre el sitio donde se encuentra instalada la placa, generando valores de velocidad, conteo, presencia y clasificación.
- Sensor de onda de radar, emplean ondas continuas de frecuencia modulada que detectan los vehículos de forma dinámica o estática, obteniendo así, los valores de velocidad, conteo clasificación, presencia y esta tecnología es posible emplearla en condiciones multicarril.
- Sensores infrarrojos, generan una luz infrarroja que se detecta del lado contrario, cubriendo el ancho de carril, que al paso de un vehículo es

interrumpida registrando los datos de velocidad, conteo, presencia clasificación y este puede ser empleado para el análisis multicarril.

- Detectores ultrasónicos, miden la distancia en función de la reflexión de ultrasonidos y trabajan libres de roces mecánicos, esto nos permite obtener datos de presencia, conteo, clasificación.
- Detección por medio de cámaras de video, con estos dispositivos es posible analizar a través del procesamiento de imágenes capturadas en el video mediante *software* de video inteligente empleando algoritmos de detección para poder determinar el conteo, presencia, velocidad y clasificación, también es posible realizar la detección multicarril.
- Datos móviles que provienen de dispositivos GPS o teléfonos móviles los cuales pueden registrar velocidad, posición y tiempo, que en su posterior procesamiento pueden generar una gran fuente de información.

En las últimas décadas se han analizado e implementado diversas técnicas de optimización de los sistemas de control del tránsito, Deng *et al.* (2005), midió el tránsito en tiempo real por medio de una metodología basada en la observación, de la cual consiguieron segmentar objetos de la infraestructura, realizar una clasificación y determinar las condiciones del flujo en un entorno urbano. De este análisis se generó un algoritmo de control adaptativo de la señal de tránsito abarcando las condiciones de ir en trayectoria recta, girar a la derecha o girar a la izquierda, mejorando las condiciones de la longitud de colas en la intersección. Un año después Cheng *et al.* (2006), propuso un algoritmo de control adaptativo para un grupo de intersecciones, mejorando las condiciones de la longitud de cola, el principio del algoritmo está basado en realizar una optimización en un número fijo de cambios de fase, pero de tiempos variables.

La implementación de nuevos enfoques para el mejoramiento de los algoritmos adaptativos con controladores difusos fueron propuestos por Wen *et al.*

(2010) y posteriormente Bhave *et al.* (2019) quienes emplearon un algoritmo de aprendizaje de refuerzo de agente único, el cual aprovecha la detección de objetos para calcular la temporización de la señal usando conjuntos difusos. Otros autores han aprovechado la conectividad entre vehículos para generar algoritmos de control de señal cooperativo que en conjunto con los detectores de tránsito fijo permiten pronosticar condiciones futuras del tránsito (Liu *et al.*, 2019).

De acuerdo con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2014), es recomendable emplear sistemas de control del tránsito de tiempo fijo en las intersecciones donde los patrones de movilidad son constantes o relativamente estables. Algunas de las ventajas presentadas por la implementación de estos sistemas se exponen a continuación:

- Se facilita la coordinación del sistema de control del tránsito en las intersecciones adyacentes con mayor precisión que con los sistemas adaptativos. Esta es una ventaja destacable si se busca coordinar varias intersecciones sucesivas o de una red.
- No depende de los sensores que detectan el paso de los vehículos, por lo que la operación del controlador no se ve afectada a causa de condiciones extraordinarias que impidan que los vehículos circulen por los puntos de detección.
- En zonas donde existe circulación intensa y constante de peatones, los sistemas no accionados por el tránsito generan mayor nivel de confianza para los usuarios activos ya que los sistemas adaptativos están en constante cambio, volviendo menos predecible el periodo en el que el peatón puede realizar el cruce con seguridad.
- El costo de los equipos no accionados es mucho más económico, ya que los sistemas adaptativos requieren de dispositivos complementarios para realizar la detección de los vehículos y *software* sofisticados para su correcta operación, ocasionando que se eleve bastante el costo inicial. En cuanto a mantenimiento y conservación

de los sistemas de tiempo fijo, es más sencillo llevar a cabo su mantenimiento y mucho menos costoso debido a que operan con dispositivos menos especializados para realizar las rutinas para las que son programados.

Los parámetros básicos de control para realizar el ajuste periódico de las variaciones de los volúmenes de tránsito son: el ciclo, el intervalo, las fases y el desfase. Para realizar la coordinación de los semáforos de tiempo fijo, las intersecciones deben estar dentro de un radio de 400 m entre cada una de ellas, sin embargo, aún se pueden obtener buenos resultados en distancias menores a 800 m, afirma la dependencia. La coordinación de los dispositivos de tiempo fijo se programa generalmente por medio de un control maestro el cual se encuentra interconectado a controles locales de forma alámbrica, por frecuencias de radio o conectados mediante Sistemas de Posicionamiento Global utilizando tecnología satelital.

Díaz-Ivorra *et al.* (2002) definen la coordinación de los sistemas de control de tránsito entre intersecciones sucesivas como, la programación de los cambios de luz en función de la velocidad deseada y la distancia entre intersecciones, de tal forma que los vehículos puedan atravesar la vialidad de extremo a extremo a una velocidad constante. Los métodos basados en el criterio geométrico suelen ser denominados por la expresión de “onda verde”, esta metodología ha demostrado que al ser aplicada en corredores y arterias principales se logra la reducción del congestionamiento, reducción de los puntos de parada, disminución de los tiempos de demora y aumentan los niveles de comodidad del usuario gracias a que al conducir a una velocidad determinada sin tener que detenerse a lo largo del corredor el usuario aprecia directamente las ventajas de la coordinación.

Las estrategias de onda verde se han implementado con éxito en países latinoamericanos como Argentina, Colombia, Perú y México, estos modelos de coordinación se han posicionado como soluciones eficientes de bajo costo para realizar el mejoramiento del sistema de control de tránsito. Nagatani (2007), analizó

el comportamiento del tránsito vehicular con estrategias de control de onda verde y desarrolló un modelo de forma unidireccional. Zheng y Xu, 2011 y Ye *et al.*, 2014, presentaron modelos bidireccionales para redes vehiculares en zonas urbanas que pretenden maximizar los anchos de banda generando esquemas de sincronización precisos.

En los últimos años algunos investigadores han implementado estrategias de onda verde de la mano de los sistemas de transporte inteligente, de tal forma que se pudieran proponer soluciones integrales en función de las condiciones actuales de la red vial. Tal es el caso de Goryaev *et al.* (2018) quienes emplearon un sistema de control de onda verde para dar prioridad al sistema de transporte público, Boudarba y Moussa (2018) analizaron el impacto que tiene un sistema de onda verde comparando el rendimiento de las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V, por sus siglas en inglés) y Rajak *et al.* (2020) propone un sistema de monitoreo en tiempo real para dar prioridad a los vehículos de emergencia de tal forma que se logren realizar recorridos rápidos y seguros a través de una red vial.

En resumen, la bibliografía mencionada en este apartado se presenta para que sirva de apoyo y sustento del enfoque que se le otorgó a la presente investigación, buscando entonces lograr realizar el monitoreo del tránsito en un corredor urbano empleando dispositivos GPS y posteriormente realizar una coordinación del sistema de semáforos fijos instalados de forma sucesiva en un entorno urbano.

3. METODOLOGÍA

Con la finalidad de establecer la relación entre un vehículo instrumentado y el flujo vehicular en una red vial para generar una mejora en la operación de las intersecciones señalizadas, se propone una metodología que consta de tres etapas con un total de nueve pasos. La primera etapa denominada preproceso contempla la realización de todas las actividades previas al periodo de prueba, la segunda etapa se refiere a la recolección de datos en campo, y finalmente el procesamiento y análisis de datos, en esta etapa se generan las estrategias de control de tránsito con el fin de lograr un mejoramiento en la operación del sistema vial, el diagrama de la secuencia de pasos a seguir se presenta a continuación en la Figura 3-1.

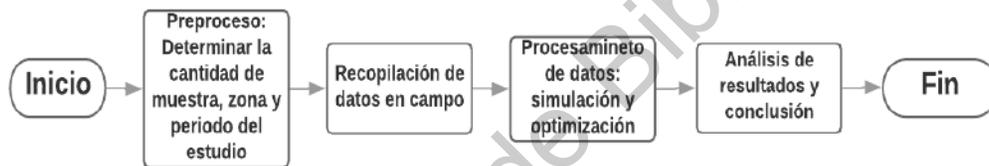


Figura 3-1. Diagrama de etapas de la metodología.

Fuente: Elaboración propia.

3.1 PREPROCESO

3.1.1 Determinación de la zona de estudio

Se selecciona y limita una zona de estudio para así poder determinar los alcances del trabajo. Se realiza el análisis completo de un corredor vial empleando estrategias de monitoreo de largo alcance, buscando mejorar el sistema de control

del tránsito a lo largo de todo el corredor. Se propone elaborar el estudio en el municipio de Santiago de Querétaro debido a que en los últimos años el número de vehículos ha aumentado considerable en la zona, esta situación presenta un reto para los administradores de la infraestructura vial ya que se debe dar servicio a toda la población de la mejor forma posible de forma eficaz. A continuación se muestra el mapa de localización del municipio seleccionado en la Figura 3-2.

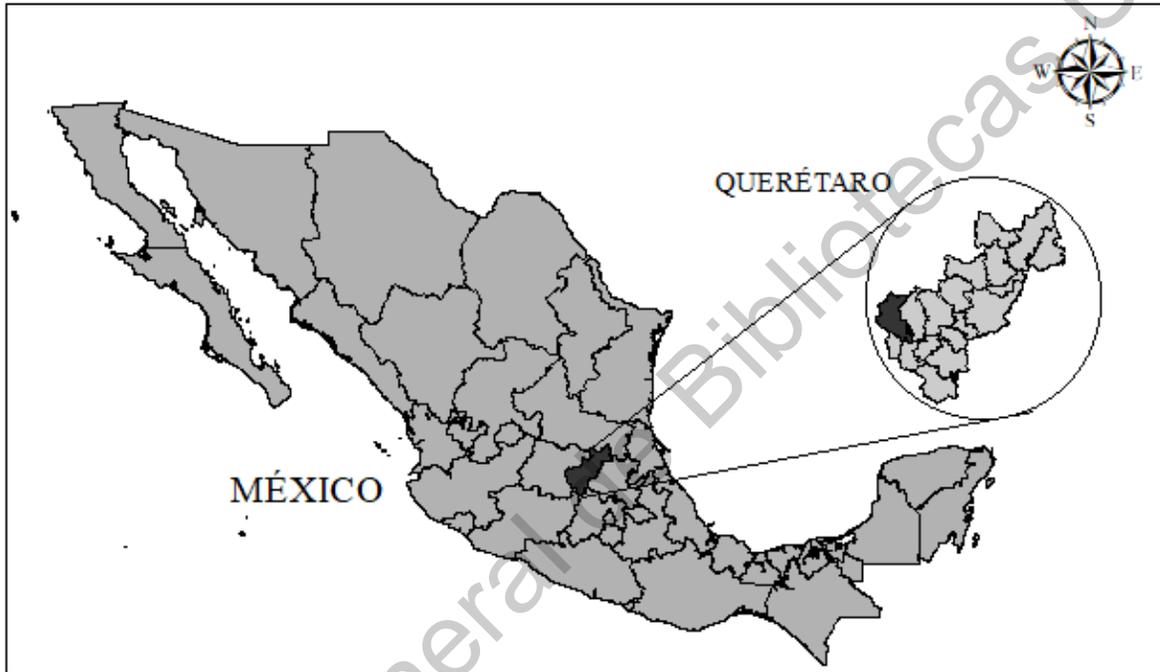


Figura 3-2. Mapa de localización del municipio de Querétaro.

Fuente: Obtenida del programa ArcGis.

La vialidad analizada es la Avenida Ignacio Zaragoza debido a que es considerada un eje estructurante que conecta a la ciudad de oriente a poniente. Cuenta con una longitud de 2.667 km, considerando como punto inicial la calle Churubusco y su punto final en la calle La Aurora donde se encuentra ubicada una rotonda. Las características geométricas de la vialidad permiten que una gran cantidad de vehículos circulen por esta vialidad, también cabe mencionar que por este corredor transita la mayoría de las rutas de transporte público. Una vez establecido lo anterior, se determina que el Volumen Horario de Máxima Demanda

(VHMD) para una de las intersecciones centrales del corredor, específicamente el nodo que conecta la Avenida Zaragoza con Ezequiel Montes presenta un VHMD de 4211 vehículos mixtos y un nivel de servicio global F en la intersección.

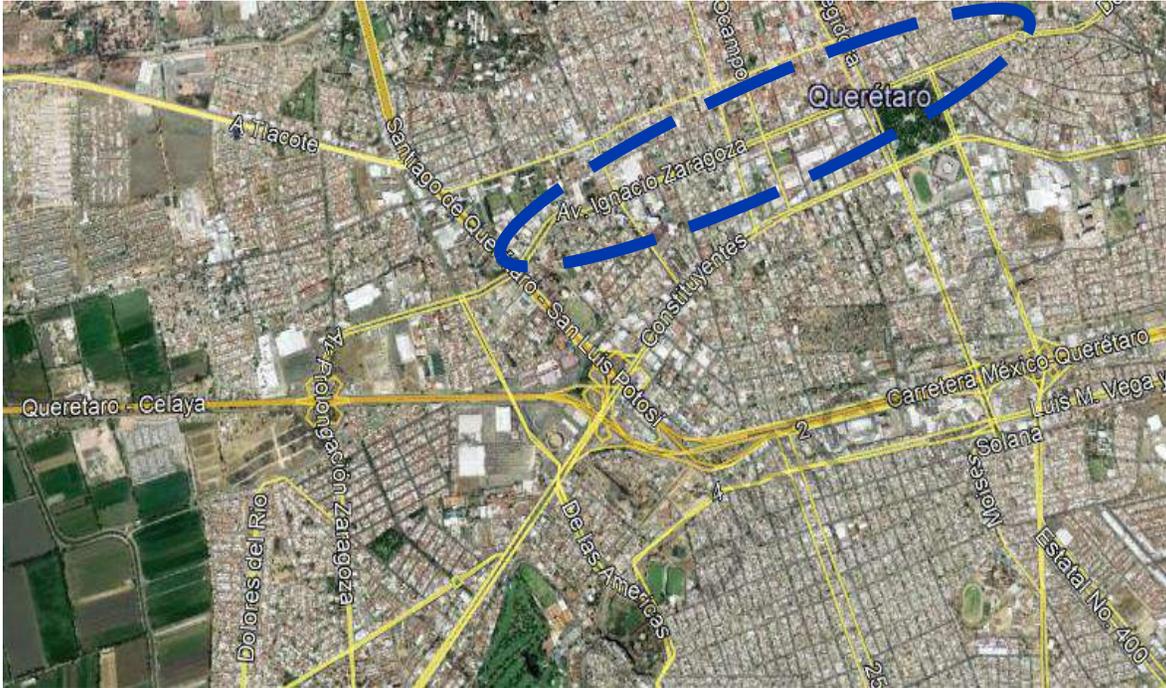


Figura 3-3. Ubicación de la vialidad de estudio.

Fuente: Obtenida de Google Earth.

Previo a emprender los recorridos es necesario determinar los puntos iniciales y finales del circuito, así como los puntos de control donde el analista considere importante tomar el registro correspondiente de los tiempos de recorrido y demoras. Se opta por seleccionar las intersecciones señalizadas con sistemas de control de tránsito, es decir que se consideran puntos de control a los nodos en los que existen semáforos que se encuentran a lo largo de la ruta. Se determina un circuito en la Avenida Ignacio Zaragoza en ambos sentidos, entre la avenida 5 de Febrero y Manuel acuña. En este tramo se ubican 13 intersecciones, siendo Churubusco la primera intersección señalizada con semáforo, ordenadas en sentido poniente a oriente hasta llegar a la intersección con Manuel Acuña, la cual es el

punto de control final del recorrido para posteriormente comenzar el circuito en sentido oriente a poniente.

Es importante conocer la distancia que existe entre cada punto de control, esto se logra midiendo en campo con el método más preciso posible o bien, obteniéndolas de algún plano o inventario existente. Se presenta la Tabla 3-1 con el nombre de los puntos de control propuestos con su correspondiente cadenamiento, el cual nos permite conocer la distancia entre cada intersección de análisis, a continuación, se muestra la ubicación de cada una de las intersecciones en la Figura 3-4.

Tabla 3-1. Distancia entre puntos de control.

Puntos de Control	Cadenamiento en sentido Poniente Oriente	Cadenamiento en sentido Oriente Poniente
Churubusco	0+000	2+277
Tecnológico	0+250	2+038
Ignacio Pérez	0+540	1+751
Nicolás Campa	0+694	1+595
Ezequiel Montes	0+872	1+419
Melchor Ocampo	1+035	1+255
Vicente Guerrero	1+158	1+131
Ignacio Allende Sur	1+360	0+931
Juárez Sur	1+554	0+739
Corregidora	1+605	0+684
Alameda	1+770	0+521
Luis Pasteur	1+938	0+348
Manuel Acuña	2+293	0+000

Fuente: Elaboración propia

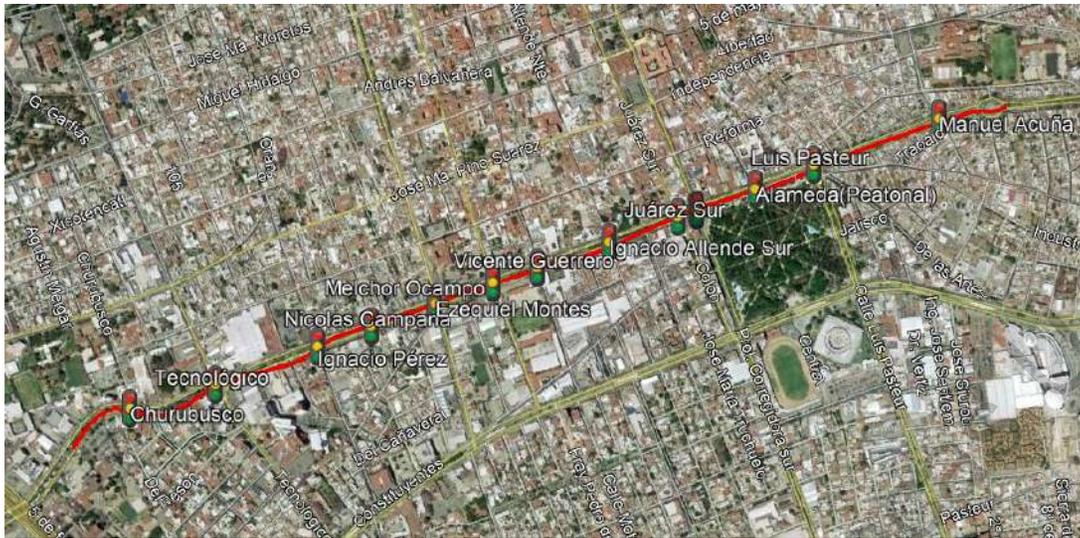


Figura 3-4. Ruta y puntos de control del circuito

Fuente: Obtenida de Google Earth.

3.1.2 Período de prueba

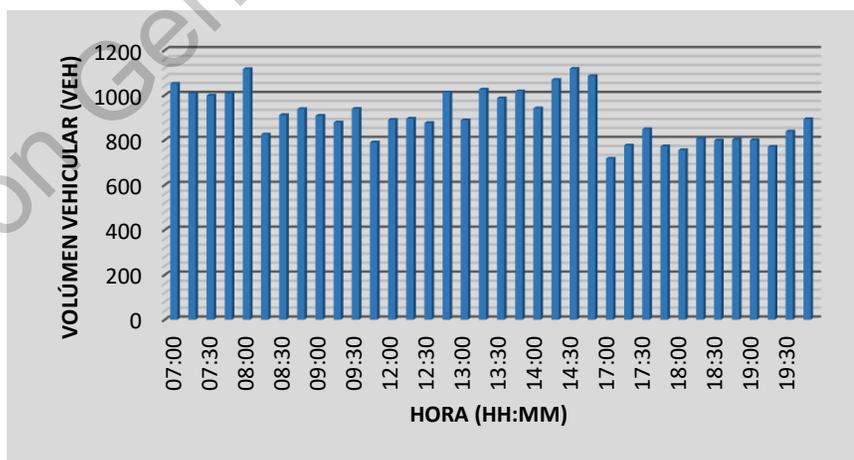
Los recorridos se deben efectuar en días típicos de una semana ordinaria, generalmente de martes a jueves con el propósito de abarcar condiciones de comportamiento normal en la corriente del tránsito (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2006). Como condición adicional a las recomendaciones del autor, se plantea realizar el estudio en una situación climática favorable, ya que en caso de precipitaciones se puede ver afectado el ritmo del flujo vehicular típico. En cuanto a la hora de realización del estudio, se propone emplear la Hora de Máxima Demanda (HMD) la cual considera el periodo pico, ya que lo que se busca realizar es el mejoramiento para condiciones de redes viales saturadas.

De acuerdo con Cal y Mayor y Cárdenas (2007), las variaciones de los volúmenes de tránsito deben ser consideradas dinámicas, sin embargo, sus variaciones son rítmicas y repetitivas, permitiéndonos así, relacionar volúmenes de

un lugar y tiempo, con volúmenes de otro lugar y tiempo. Las variaciones entonces dependen de las actividades que prevalezcan en las vialidades, en zonas urbanas se tienen variaciones típicas: los volúmenes vehiculares son bajos durante la madrugada, alcanzando un valor máximo entre las 7:30 h y las 8:30 h, eventualmente se presenta una disminución hasta que se llega a otro valor máximo entre las 14:00 h y las 15:00 h, posterior a esto, tienden a disminuir los volúmenes hasta que aparece un tercer periodo máximo entre las 18:00 h y las 20:00 h, finalmente los valores tienden a disminuir nuevamente hasta llegar a un mínimo por la madrugada.

Para determinar la Hora de Máxima Demanda en el corredor Zaragoza, se emplean datos de un aforo manual realizado en dicha vialidad en la intersección con Ezequiel Montes, dividiendo en tres periodos en los cuales se presenta comúnmente los máximos volúmenes vehiculares. El periodo matutino comprende de las 7:00 a las 10:00 h, el periodo de medio día de las 12:00 a 15:00 h y finalmente el horario vespertino de 17:00 a 20:00 h. A continuación, se muestra la Tabla 3-2 donde se presentan los volúmenes de tránsito vehicular mixto obtenidos.

Tabla 3-2. Volúmenes de tránsito vehicular mixto en la intersección Zaragoza-Ezequiel Montes



Fuente: Datos obtenidos de un aforo vehicular realizado por los alumnos de ingeniería civil de la Universidad Autónoma de Querétaro.

La tabla antes mostrada esta seccionada por intervalos de 15 minutos, para determinar la hora de máxima demanda se suma en grupos de cuatro consecutivamente, iniciando a partir de las 7:00 h y terminando a las 20:00 h. El volumen máximo obtenido en el periodo matutino es de 4128 vehículos mixtos para el periodo de 7:15 h a 8:15 h, mientras que en el periodo de medio día es de un total de 4211 vehículos mixtos en un horario de 14:00 a 15:00 h.

3.1.3 Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra se refiere al número mínimo de veces que se debe recorrer la ruta o circuito, y de acuerdo con Box y Oppenlander (1985) depende del error tolerable de la media de las velocidades de recorrido estimado y de la variabilidad o dispersión de las observaciones.

El autor sugiere algunos rangos para el error permitidos en el estimado de la velocidad media de acuerdo al tipo de estudio que se quiere abordar, en este caso debido a que existirá una modificación operativa en la vialidad, optamos por un estudio antes y después, para el cual se sugiere una velocidad media: ± 2.0 a 5.0 km/h.

Es necesario realizar algunos recorridos previos en la hora de máxima demanda de tal forma que sea posible conocer cuál es la variabilidad entre los recorridos, ya que las intersecciones que cuentan con dispositivos de control del tránsito, influyen en gran medida en el tiempo total del recorrido. Para determinar una medida de la variabilidad entre los recorridos empleamos la Ec. 10, que se muestra a continuación.

$$R = \frac{\sum_{i=2}^n |V_i - V_{i-1}|}{n-1} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:

R : Rango promedio de la velocidad del recorrido (km/h).

$\Sigma |V_i - V_{i-1}|$: Suma de los valores de todas las diferencias de velocidades entre cada viaje.

V_i : Velocidad asociada al tiempo de viaje (km/h).

n : Número de recorridos de prueba completos.

Se realizaron cuatro recorridos en el circuito Zaragoza el día jueves 19 de Septiembre de 2019 con la finalidad de conocer la variabilidad que existe entre los recorridos, para la recolección de los datos se empleó un dispositivo colector de datos GPS de elaboración propia que se describe más adelante. La finalidad de este dispositivo es aumentar la confiabilidad al momento de recolectar los datos, generando una base de datos precisa. A continuación, se muestra la Tabla 3-3, en ella podemos observar que cada recorrido del circuito está agrupado por los puntos de control inicial, medio y final.

Tabla 3-3. Recorridos preliminares en el circuito Zaragoza.

Punto de Control	Latitud (deg)	Longitud (deg)	Vel (Km/h)	Fecha (m)	Hora (hh:mm:ss)	Altitud (m)	Satélites (unidad)
Inicial	20.58305358	-100.4058228	30.22	19/09/2019	14:03:49	1824.9	4
Medio	20.59140014	-100.3820953	25.22	19/09/2019	14:08:57	1859.9	5
Final	20.58327293	-100.4058914	24.06	19/09/2019	14:16:53	1807.7	5
Inicial	20.58322715	-100.4057922	6.72	19/09/2019	14:17:39	1812	6
Medio	20.59129142	-100.382225	29.08	19/09/2019	14:25:09	1841.1	4
Final	20.58339118	-100.4057388	15.89	19/09/2019	14:35:19	1815.4	6
Inicial	20.58332633	-100.4056625	29.67	19/09/2019	14:35:22	1817.8	6
Medio	20.59120559	-100.382225	32.48	19/09/2019	14:41:58	1828	6

Final	20.58329582	-100.4058228	13.74	19/09/2019	14:49:54	1804.6	6
Inicial	20.58326721	-100.4058075	24.06	19/09/2019	14:50:18	1804.5	6
Medio	20.59126091	-100.3821411	20.63	19/09/2019	14:56:34	1857	7
Final	20.5831604	-100.4059525	36.71	19/09/2019	15:06:16	1819.4	6

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenida la hora exacta en la que el vehículo pasa por cada punto de control podemos primeramente calcular el tiempo total para cada recorrido con la diferencia entre la hora en que cruza por el punto final menos la hora en que cruza el punto inicial. La distancia total del circuito es conocida por lo que es posible calcular la velocidad promedio de cada recorrido dividiendo la distancia total del circuito entre el tiempo total del recorrido. Se calcula la diferencia de la velocidad promedio del primer recorrido y el subsiguiente, de forma consecutiva hasta obtener todas las diferencias, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Amplitud media de los recorridos preliminares en el circuito Zaragoza.

Numero de Recorrido	Distancia (km)	Tiempo de Recorrido (hh:mm:ss)	Velocidad Promedio del Recorrido (Km/h)	Diferencia
1	5.351	00:13:04	24.57	6.39771082
2	5.351	00:17:40	18.17	3.91807686
3	5.351	00:14:32	22.09	1.98314244
4	5.351	00:15:58	20.11	

Fuente: Elaboración propia

Ya que se obtienen las diferencias entre los recorridos, se emplea la Ec. 10 para obtener la amplitud media de las velocidades de recorrido.

$$R = \frac{(6.39770182+3.91807686+1.98314244)}{4-1} = 4.09964337 \quad (\text{Ec. 10})$$

Se estimó la amplitud media de las velocidades de recorrido y se selecciona el error máximo tolerable de la media de las velocidades, se emplea la Tabla 2-1 la cual fue mencionada anteriormente en el punto 2.4 del marco teórico, esta tabla es presentada por Box y Oppenlander para determinar el número mínimo de recorridos para un nivel de confianza del 95%.

Tabla 3-5. Tamaño mínimo de muestra para estudios de tiempos de recorrido y demora con un nivel de confianza del 95%.

Amplitud media de la velocidad de recorrido (km/h)	Número mínimo de recorridos para un error tolerable específico (km/h)				
	±2.0	±3.5	±5.0	±6.5	±8.0
5.0	4	3	2	2	2
10.0	8	4	3	3	2
15.0	14	7	5	3	3
20.0	21	9	6	5	4
25.0	28	13	8	6	5
30.0	38	16	10	7	6

Fuente: Box y Oppenlander (1985).

Para una amplitud media de la velocidad de recorrido de 4.09964337 km/h y un error tolerable de ± 2.0 km/h concluimos que son necesarios al menos cuatro recorridos en la vialidad de estudio para realizar nuestro muestreo correctamente.

3.1.4 Elaboración de un dispositivo colector de datos GPS

Desarrollamos un dispositivo tecnológico para obtener los tiempos de recorrido y demoras en zonas urbanas. La base de datos generada, permite elaborar mapas de ruta a nivel de red para identificar los puntos en donde se presentan los tiempos de demora, de esta forma la recolección de los datos se torna más objetiva al estandarizar el proceso de medición con un instrumento tecnológico de alta precisión. Con esta información y apoyándonos de herramientas

computacionales se realiza el análisis de los datos obtenidos mediante *software* de computadora como ArcGIS que se especializa en modelos complejos de análisis de datos georreferenciados.

El proceso de la obtención de datos generados en los recorridos con el método del vehículo flotante, emplea un dispositivo que se encarga de registrar la ubicación geográfica y velocidad del vehículo mientras se realiza el recorrido, esta información se genera en intervalos de un segundo de forma automática y se guarda en formato digital mediante un protocolo de almacenamiento de datos gracias a la programación de los componentes del dispositivo, en la Figura 3-5 se ilustra el proceso que ejecuta el dispositivo para su correcta operación.

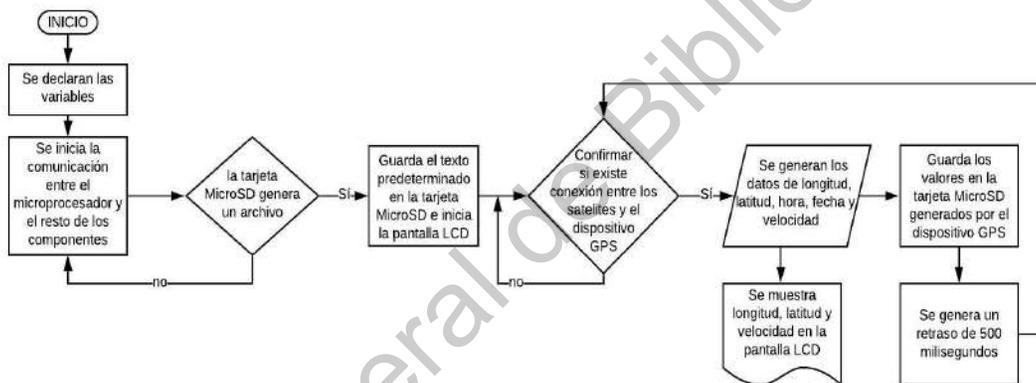


Figura 3-5. Diagrama del proceso de operación del dispositivo colector de datos GPS.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta la función que cumple cada uno de sus componentes del dispositivo GPS: la tarjeta electrónica ARDUINO MEGA 2560 con un microprocesador ATMEGA2560 el cual se encarga de controlar y ejecutar las tareas de la lógica de programación del dispositivo en lenguaje C++, el módulo GPS Neo-6M que cuenta con un indicador de estado de conexión LED y una antena GPS, gracias a este módulo se logra la georreferenciación al recibir la señal emitida por los satélites disponibles de la zona, la pantalla LCD 16X2 muestra los datos que se

van obteniendo de tal forma que nos permita comprobar que el dispositivo está trabajando correctamente, un adaptador I2C para realizar una conexión más eficaz entre la pantalla y el microcontrolador, finalmente el módulo microSD y la tarjeta de memoria con capacidad de almacenamiento de 8 Gb para registrar los datos generados en campo, tales como; latitud, longitud, hora, fecha y velocidad. En la Figura 3-6 se muestra el dispositivo con todos sus componentes y en la Figura 3-7 el diagrama de conexiones.

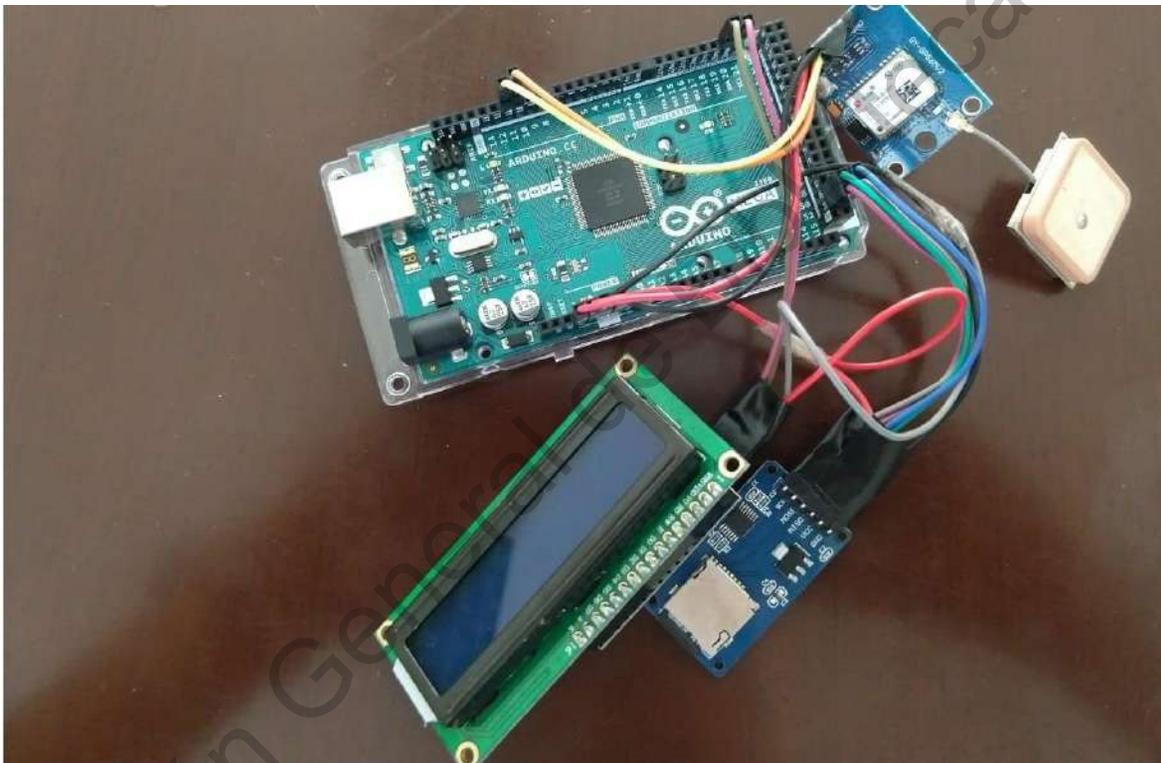


Figura 3-6. Dispositivo colector de datos GPS.

Fuente: Elaboración propia.

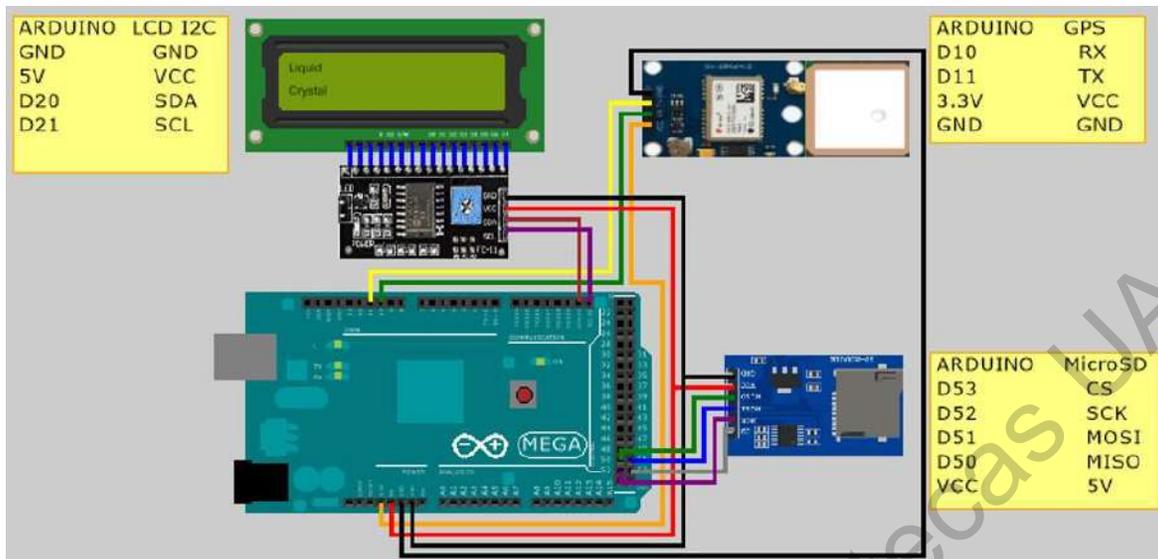
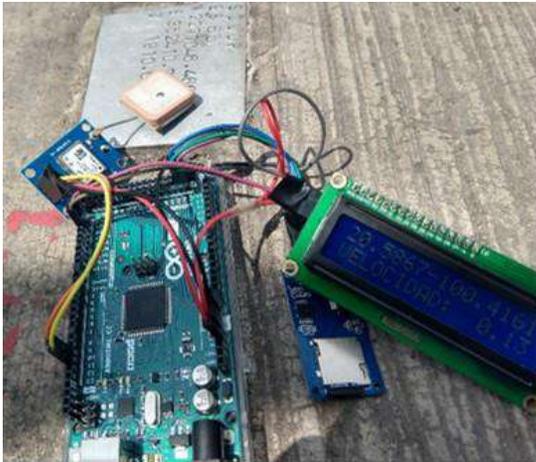


Figura 3-7. Diagrama de conexiones del dispositivo colector de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Una de las condiciones básicas para el correcto desempeño de un dispositivo es que dicho instrumento presente un alto nivel de confiabilidad, es decir, el grado de precisión o exactitud con que opera, de tal forma que, si medimos repetidamente la misma situación bajo las mismas condiciones, el resultado producido debe ser el mismo. Para validar la confiabilidad del dispositivo propuesto se mide la precisión de los datos recolectados bajo dos condiciones de prueba distintas. La primera condición la denominamos prueba estática mientras que la segunda toma el nombre de prueba cinemática.

En la prueba estática se tomaron dos puntos base de las estaciones geodésicas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) materializadas sobre terreno con una placa metálica de aluminio empotrada con la inscripción de sus coordenadas de georreferencia. La antena GPS se coloca justo sobre la señal indicada en la lámina y posteriormente se enciende el dispositivo que se encargará de recabar la información, una vez que la pantalla LCD muestra las coordenadas y la velocidad, inferimos que el dispositivo está recolectando información de manera satisfactoria como se observa en la Figura 3-8.



Punto A

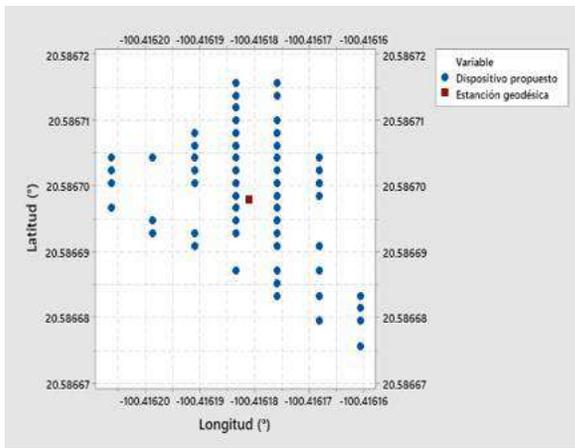


Punto B

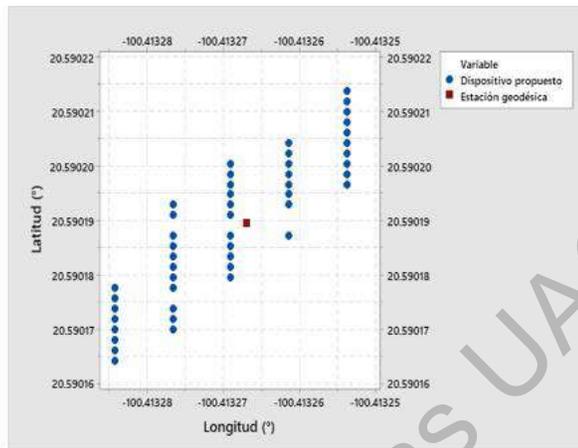
Figura 3-8. Recolección de muestras en las estaciones geodésicas.

Fuente: Elaboración propia.

El dispositivo debe permanecer inmóvil mientras se realiza el muestreo, esto con el fin de no generar perturbaciones que puedan causar variación en las lecturas que se podrían atribuir a un error de muestreo y no propiamente del dispositivo. Para el punto A se tomaron un total de 318 lecturas mientras que en el punto B se consideraron 263. Una vez recolectada la información se elaboran las gráficas de dispersión de los datos respecto de la estación geodésica correspondiente a cada base de datos, ambas gráficas se muestran a continuación en la Figura 3-9, en ellas se observan dos variables; los puntos en color azul se refieren a las muestras generadas por el dispositivo colector de datos y los puntos de color rojo indican el punto donde se encuentra cada estación geodésica, los ejes coordenados están referidos en función de la longitud y latitud.



Punto A



Punto B

Figura 3-9. Gráficos de dispersión.

Fuente: Elaboración propia.

Se procede a calcular los indicadores estadísticos, obteniendo valores como la media, la desviación estándar, el error típico y otras medidas de interés. Se realiza una prueba de equivalencia para una muestra con la que determinamos si la media de la muestra es equivalente a un valor específico, en este caso emplearemos las coordenadas de las estaciones geodésicas para cada punto, considerando así la hipótesis nula (H_0 : La diferencia entre las medias se encuentra fuera del intervalo de equivalencia) y la hipótesis alterna (H_1 : La diferencia entre las medias se encuentra dentro del intervalo de equivalencia) para un intervalo de confianza del 95 % y un nivel de significancia de 0.05. A continuación, se reflejan los resultados obtenidos en las Tablas 3-6 y 3-7.

Tabla 3-6. Indicadores estadísticos del punto A.

Indicador estadístico	Latitud (°)	Longitud (°)	Velocidad (Km/h)	Satélites	Distancia al punto de georreferencia (m)
Tamaño de la muestra	318	318	318	318	318
Media	20.586698	-100.41618	0.140094	9	1.142516
Mediana	20.5867	-100.416183	0.09	8	1.073771
Moda	20.586704	-100.416176	0.09	8	0.880256

Desviación estándar	7.82E-06	9.51E-06	0.163752	1.674826	0.659473
Varianza de la muestra	6.12E-11	9.04E-11	0.026815	2.805041	0.434904
Error típico	4.39E-07	5.33E-07	9.18E-03	9.39E-02	3.70E-02
Mínimo	20.586676	-100.416206	0	5	0.268475
Máximo	20.586716	-100.416161	1.06	11	3.27028
Rango	4.01E-05	4.58E-05	1.06	6	3.001804
Intervalo de equivalencia	-2.40E-05	-5.00E-05			
	2.40E-05	5.00E-05			
P-Valor	0.0000881	0.0000057			

Fuente: Elaboración propia.

La distancia al punto de georreferencia se obtuvo con la fórmula de *Haversine* para cada una de las muestras, de esta forma, dados los valores de longitud y latitud de cada punto coordinado respecto del punto de análisis calculamos la distancia entre estos puntos. En la Tabla 3-6 determinamos que el valor máximo de la distancia de georreferencia es de 3.27 m a la redonda respecto del valor real.

Tabla 3-7. Indicadores estadísticos del punto B.

Indicador estadístico	Latitud (°)	Longitud (°)	Velocidad (Km/h)	Satélites	Distancia al punto de Georreferencia (m)
Tamaño de la muestra	263	263	263	263	263
Media	20.590191	-100.413268	0.094487	9	1.553998
Mediana	20.590193	-100.413269	0.07	9	1.349072
Moda	20.5902	-100.413269	0.06	9	1.349072
Desviación estándar	1.26E-05	1.02E-05	0.075723	0.68281	0.831629
Varianza de la muestra	1.59E-10	1.04E-10	0.005734	0.466229	0.691607
Error típico	7.78E-07	6.30E-07	0.004669	0.042104	0.05128
Mínimo	20.590164	-100.413284	0	7	0.232507
Máximo	20.590214	-100.413254	0.37	9	3.341144
Rango	4.96E-05	3.05E-05	0.37	2	3.108637
Intervalo de equivalencia	-3.50E-05	-3.50E-05			
	3.50E-05	3.50E-05			
P- Valor	0.0000135	0.0002493			

Fuente: Elaboración propia.

Para la prueba cinemática se obtienen dos grupos de datos, el primero es generado por el dispositivo colector de datos propuesto y el segundo fue recabado

por un dispositivo comercial GPS con pantalla de 2.6 pulgadas, que cuenta con una capacidad de recopilación de hasta 5000 puntos georreferenciados y presenta una precisión de 3 m. Ambos dispositivos generan información a la par mientras se encuentran a bordo de un vehículo que circula por una vialidad al cual denominamos vehículo flotante o bien instrumentado. Se instalan ambos artefactos en el tablero que se encuentra en la parte frontal del vehículo, colocando el dispositivo propuesto lo más próximo al dispositivo comercial.

Las dos bases de datos generadas son empleadas para obtener los indicadores estadísticos que nos permitirán conocer la precisión de nuestro dispositivo respecto de uno comercial. Se realizó una prueba de equivalencia pareada, ya que esta se puede emplear cuando dos grupos de datos de n observaciones de interés se recaban en pares, cada par de datos observados se toman en condiciones homogéneas, aunque las condiciones cambien de un par a otro. Para esto se considera que las coordenadas de georreferencia y las velocidades recopiladas por el dispositivo propuesto se recolectan en pares con los del dispositivo comercial que registran valores segundo a segundo. El procedimiento de análisis consistió entonces en comparar las diferencias entre las lecturas de cada par para cada variable, si ambas se encuentran dentro del intervalo de equivalencia, se confirma que son equivalentes, de tal manera que la prueba considera la Hipótesis nula (H_0 : La diferencia entre las medias se encuentra fuera del intervalo de equivalencia) y la hipótesis alterna (H_0 : La diferencia entre las medias se encuentra dentro del intervalo de equivalencia) para un intervalo de confianza del 95 % y un nivel de significancia de 0.05, lo resultados se reflejan en la tabla 3-8.

Tabla 3-8. Indicadores de la equivalencia pareada.

Indicador estadístico	diferencia_μ Latitud (°)	diferencia_μ Longitud (°)	diferencia_μ Velocidad (Km/h)
Media	-0.000004	0.000008	-0.043134
Desviación estándar	0.000027	0.000063	1.564623
Error estándar de la media	0.000003	0.000008	0.191149
Intervalo de Confianza de 95% para la diferencia_μ	-0.000011	-0.000007	-0.424779
	0.000002	0.000024	0.338507

Intervalo de Equivalencia	-0.000015	-0.000025	-0.5
	0.000015	0.000025	0.5
P-Valor	0.001047	0.016144	0.0098533

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Recopilación de datos en campo

3.2.1 Propiedades geométricas y operativas de la vialidad Zaragoza

La microsimulación pretende analizar el comportamiento del corredor Zaragoza mediante una representación del comportamiento individual de cada vehículo en la interacción con los demás vehículos en un entorno dinámico contemplando los efectos derivados de estas interacciones, tales como la velocidad, aceleración y desaceleración, esto basado en tres modelos. El primer modelo, si el vehículo tiene la necesidad de cambiar de carril (*Lane-Changing*), el segundo, si el vehículo se aproxima a una zona de conflicto (*Gap-acceptance*) y el tercero si continua por el mismo carril (*Car-Following*).

Se deben definir los elementos geométricos de las vialidades y los movimientos direccionales que pueden realizar los vehículos, esto se puede hacer obteniendo las mediciones directamente en campo utilizando estación total o estación GPS para determinar los anchos de calzada, número y anchos de carril, longitud de las vialidades, radios de curvatura, obstáculos permanentes, entre otras. O bien obtener estas características directamente de mapas georreferenciados, en este caso se emplea la opción de trazo de la geometría por medio de un mapa a escala.

El corredor Zaragoza cuenta con tres carriles, en algunas intersecciones existe un cuarto carril que sirve para dar paso a los vehículos que dan vuelta izquierda o vuelta derecha, el ancho de cada carril varía entre los 3.40 m y 3.50 m. En lo que respecta a la distancia entre cada intersección ya se indicó en el punto 3.1.1 por lo que se omite en este apartado. Una vez que se tienen estas dimensiones

es posible realizar el trazo de las vialidades en el modelo de simulación, como se muestra en la Figura 3-10.

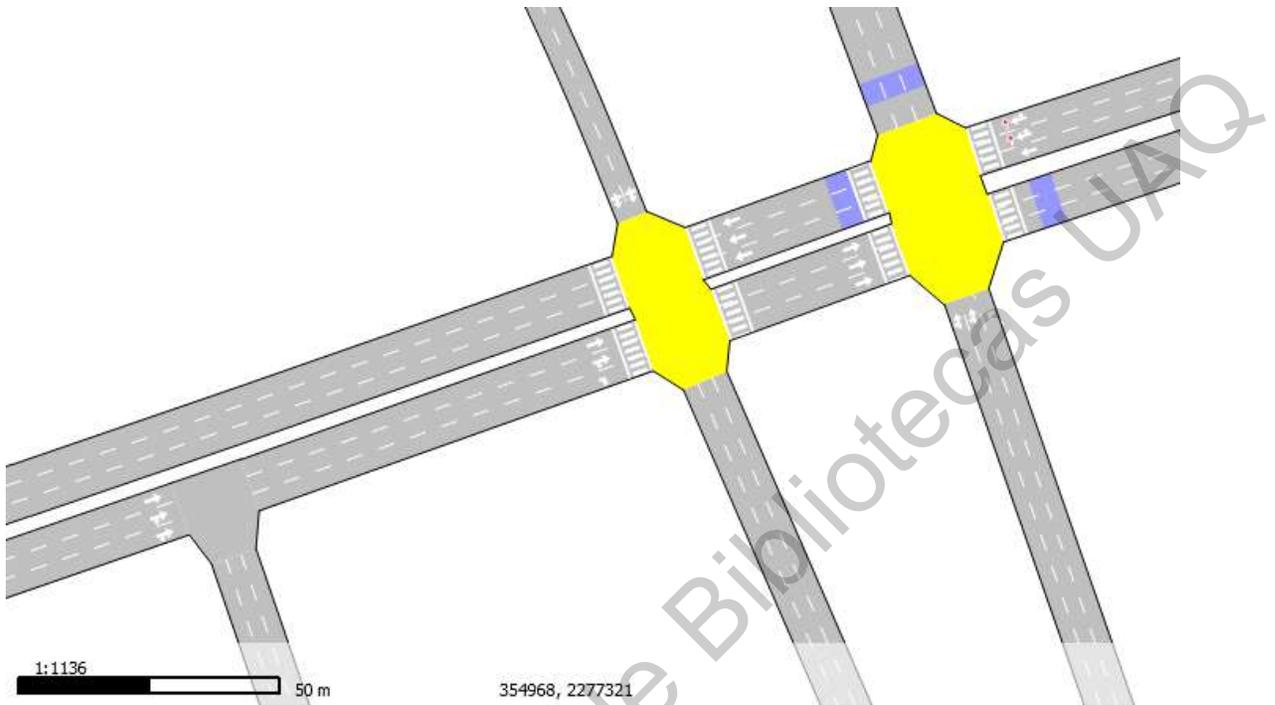


Figura 3-10. Trazo geométrico del corredor Zaragoza, intersecciones de Juárez Sur y Corregidora.

Fuente: Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro (2018).

La composición vehicular y los movimientos que realiza cada tipo de vehículo tienen un papel importante, ya que cada tipo de vehículo tiene ciertas características de aceleración, desaceleración, peso, potencia, dimensiones y radios de giro. A continuación, se presenta la Tabla 3-9 en la que se puede apreciar; la composición vehicular por intersección, el Volumen Horario total por intersección y su Factor Horario de Máxima Demanda (FHMD), para determinar este último valor se emplearon los datos del Anexo 6-3.

Tabla 3-9. Porcentajes de la composición vehicular del corredor Zaragoza.

Intersección	Volúmen Horario Mixto	Porcentaje de Vehículos ligeros	Porcentaje de Autobuses	Porcentaje de Vehículos Pesados	Factor Horario de Máxima Demanda
Churubusco	2465	85.52%	14.00%	0.49%	0.9170
Tecnológico	4296	90.39%	9.33%	0.28%	0.9496
Ignacio Pérez	3438	88.92%	10.67%	0.41%	0.8770
Nicolás Campa	2842	87.33%	12.53%	0.14%	0.9706
Ezequiel Montes	4398	90.56%	9.10%	0.34%	0.9619
Melchor Ocampo	2843	85.30%	14.42%	0.28%	0.9683
Vicente Guerrero	2707	84.63%	14.70%	0.66%	0.9654
Ignacio Allende Sur	2911	86.47%	13.05%	0.48%	0.9782
Juárez Sur	3064	86.72%	12.76%	0.52%	0.9527
Corregidora	3808	91.96%	8.04%	0.00%	0.8856
Alameda	2592	86.84%	13.16%	0.00%	0.9715
Luis Pasteur	3772	88.31%	11.69%	0.00%	0.8643
Manuel Acuña	2877	90.27%	8.90%	0.83%	0.9116

Fuente: Elaboración propia.

Al ser un área urbana, está restringido el paso de vehículos pesados de más de tres y media toneladas. De acuerdo con los datos de campo, existe un porcentaje de hasta 0.83 % de vehículos pesados. El corredor Zaragoza es una de las vialidades más concurridas por el transporte público, en ella convergen alrededor de 71 rutas considerando ambos sentidos, el porcentaje total de autobuses en la composición vehicular varía entre 8.04 % y 14.70 % a lo largo de las intersecciones analizadas. El resto se clasifican como vehículos ligeros, en los que recaen los automóviles, las motocicletas y las camionetas pickup. A continuación, se presenta la Figura 3-11 en la que se pueden observar los distintos tipos de vehículos que transitan por el corredor Zaragoza.



Figura 3-11. Composición vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

La demanda se puede determinar con aforos vehiculares para ingresar los datos a la simulación por estados de tránsito o bien, con matrices Origen Destino (O-D) que representan los viajes entre los puntos de generación y atracción que realizan los usuarios, estos se representan mediante centroides, los cuales se definen como los centros representativos de cada zona de los viajes origen o destino de la demanda. En el modelo de simulación se representan como lugares de entrada y salida de los vehículos. Para lograr que los vehículos lleguen a su destino, se requiere de infraestructura que cumpla con las condiciones de conectividad, para esto se definen las secciones y nodos que tienen la función de generar una red por la cual los usuarios puedan realizar esos viajes desde su punto de origen hasta concluir su movimiento en su respectivo destino.

Los nodos se refieren a cada una de las intersecciones entre los tramos de la red vial, mientras que las secciones se definen como los elementos de unión entre los nodos y estos están determinados por las características geométricas previamente analizadas al inicio de este apartado. La vialidad de estudio consideró

13 nodos de interés, es decir, las intersecciones que cuentan con sistemas de control de tránsito con semáforo y 39 centroides distribuidos en todo el corredor como se muestra en la Figura 3-12.

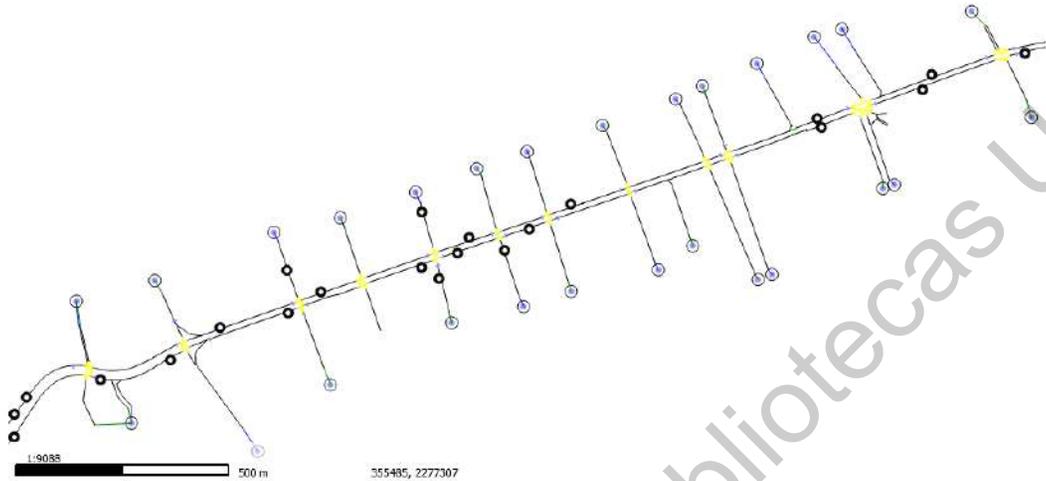


Figura 3-12. Centroides en el modelo de simulación.

Fuente: Diagrama del corredor Zaragoza, obtenido del programa AIMSUN, generado por la Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro.

Los semáforos son reguladores del tránsito en una intersección que dan el paso a vehículos, ciclistas y peatones, para que puedan realizar el cruce de la intersección de manera alternada, ordenada y segura. El sistema de tiempo fijo suele emplearse en las intersecciones donde los patrones de movilidad son constantes o relativamente estables, este sistema permite ajustar las fases en un periodo de tiempo al que denominamos ciclo.

El ciclo semafórico denota el tiempo que transcurre desde el cambio de un grupo semafórico hasta la repetición de dicha condición en la cual se realizó la secuencia completa de maniobras para todo el sistema de control de tránsito de la intersección. Todas las intersecciones del corredor Zaragoza registran un ciclo actual de 140 segundos a excepción del sistema de control instalado en la Alameda, el cual se encuentra programado con un ciclo de 73 segundos y la intersección con Manuel acuña con un ciclo de 90 segundos.

El intervalo de cambio de fase, cumple la función de alertar a los usuarios que se aproxima el cambio en la asignación del derecho de paso y se expresa como se muestra en el Ec. 11.

$$y = \left(t + \frac{v}{2a} \right) + \left(\frac{w+L}{v} \right) \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde:

Y = intervalo de cambio de fase, la suma de ámbar y todo rojo (s)

T = tiempo de percepción-reacción (se recomienda 1 s)

V = Velocidad de aproximación de los vehículos (m/s)

A = tasa de desaceleración (se recomienda 3.05 m/s²)

W = ancho de la intersección (m)

L = longitud del vehículo (se recomienda de 6.1 m)

A continuación, se presentan en la Tabla 3-10 los tiempos calculados para los intervalos de cambio de fase para cada una de las intersecciones del corredor Zaragoza, empleando la ecuación previamente mencionada.

Tabla 3-10. Intervalo de cambio de fase.

Intersección	Longitud Zaragoza (m)	Tiempo de ámbar (s)	Tiempo de Todo Rojo (s)	Y1	Longitud calle Perpendicular (m)	Tiempo de ámbar (s)	Tiempo de Todo Rojo (s)	Y2
Churubusco	17	3.28	1.66	5.00	35	3.28	2.96	6.00
Tecnológico	25	3.28	2.24	6.00	38	3.28	3.18	6.00
Ignacio Pérez	15	3.28	1.52	5.00	32	3.28	2.74	6.00
Nicolás Campa	17	3.28	1.66	5.00	35	3.28	2.96	6.00
Ezequiel Montes	27	3.28	2.38	6.00	35	3.28	2.96	6.00
Melchor Ocampo	15	3.28	1.52	5.00	35	3.28	2.96	6.00
Vicente Guerrero	15	3.28	1.52	5.00	34	3.28	2.89	6.00
Ignacio Allende Sur	13	3.28	1.38	5.00	31	3.28	2.67	6.00
Juárez Sur	21	3.28	1.95	5.00	35	3.28	2.96	6.00
Corregidora	26	3.28	2.31	6.00	33	3.28	2.82	6.00
Alameda	10	3.28	1.16	4.00	10	3.28	1.16	4.00

Luis Pasteur	47	3.28	3.82	7.00	47	3.28	3.82	7.00
Manuel Acuña	20	3.28	1.88	5.00	15	3.28	1.52	5.00

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la longitud del ciclo, Webster propone la Ec. 12.

$$C_0 = \frac{1.5L+5}{1-\sum_{i=1}^{\varphi} Y_i} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

C_0 = tiempo óptimo de ciclo (s)

L = tiempo total perdido por ciclo (s)

Y_i = máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el acceso o movimiento o carril crítico de la fase i

φ = número de fases

El tiempo total perdido por ciclo se calcula con la siguiente ecuación 13:

$$L = \sum_{i=1}^{\varphi} (A_i + TR_i) \quad (\text{Ec. 13})$$

Es necesario determinar factores de equivalencia por la presencia de vehículos pesados y los movimientos de vuelta izquierda o derecha. A continuación, se presenta la Ec 14 para convertir Volúmenes Horarios Mixtos (VHMD) en flujos de automóviles directos equivalentes por hora:

$$q_{ADE} = \frac{VHMD}{FHMD} \left(\frac{1}{f_{HV}} \right) (EV_{(I \text{ o } D)}) \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde:

$EV_{(I \text{ o } D)}$ = Automóviles directos equivalentes por vuelta Izquierda o Derecha

FHV = Factor de ajuste por vehículos pesados

Este último se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{HV} = \frac{100}{100+PT(ET-1)+PB(EB-1)+PR(ER-1)} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

PT = porcentaje de camiones

PB = porcentaje de autobuses

PR = porcentaje de vehículos recreativos

ET = automóviles equivalentes a un camión

EB = automóviles equivalentes a un autobús

ER = automóviles equivalentes a un vehículo recreativo

Basados en las ecuaciones anteriores, se realiza el análisis en la intersección con el mayor volumen vehicular, es decir, la intersección con Ezequiel Montes. A continuación se presenta en forma de Tabla 3-11, el cálculo de estos valores, para determinar el tiempo de ciclo óptimo, con el que se rige el corredor.

Tabla 3-11. Cálculo del ciclo óptimo.

Intersección	(W)	(t)	(a)	(L)	(v)	FHMD	(ET)	(EB)	(EVI)	(EVD)
Zaragoza OE	17	1	3	6.1	13.89	0.9619	2.00	2.00	1.10	2.14
Ezequiel Montes	35	1	3	6.1	13.89	0.9619	2.00	2.00	0.00	2.14

Intersección	% Autobuses	% Pesados	Volumen Total	Volumen Derecho	Volumen Vuelta IZQ	Volumen Vuelta DER
Zaragoza OE	5.00	10.00	1931.00	981.00	0.00	950.00
Ezequiel Montes	9.80	0.70	852.00	350.00	316.00	186.00

Intersección	(fHV)	(qD)	(qVI)	(qVD)	(qT)
Zaragoza OE	0.87	1173	0.00	0.00	1172.84

Ezequiel Montes	0.90	402	0.00	776.84	1178.91
-----------------	------	-----	------	--------	---------

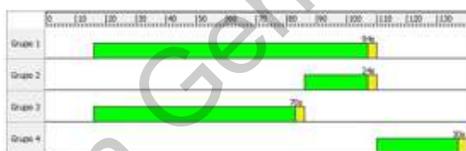
Intersección	Tiempo de ámbar (s)	Tiempo de Todo Rojo (s)	Yn	(L)	(Co)	(gT)
Zaragoza OE	3.28	1.66	4.94		0.51	
Ezequiel Montes	3.28	2.96	6.24	11.00	0.34	138.00

Fuente: Elaboración propia.

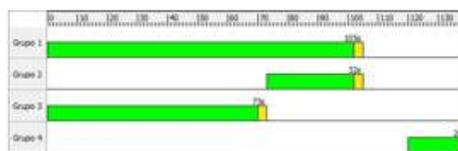
Con lo anterior, se determina que el ciclo óptimo es de 138 segundos, redondeando a los 5 segundos más cercanos, se permite aceptar el ciclo actual de 140 segundos para el corredor Zaragoza.

Las fases se definen como cada una de las divisiones del ciclo, en cada uno de estos intervalos de tiempo la configuración de colores de todos los grupos semafóricos permanece invariable. La determinación de los movimientos que pueden generarse simultáneamente no está sujeta a reglas fijas ya que dependerá directamente de las características del tránsito y las características geométricas de cada intersección. A continuación, se muestran los diagramas de fase de cada una de las intersecciones de estudio en las Figuras 3-13 y 3-14.

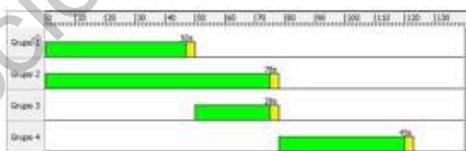
Churubusco



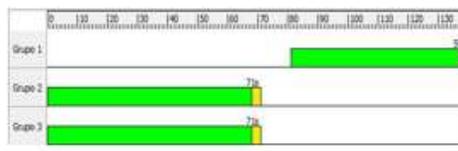
Nicolás Campa



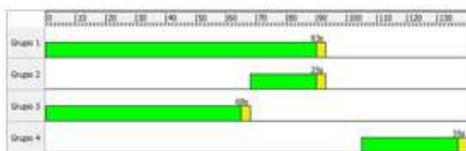
Tecnológico



Ezequiel Montes



Ignacio Pérez



Melchor Ocampo

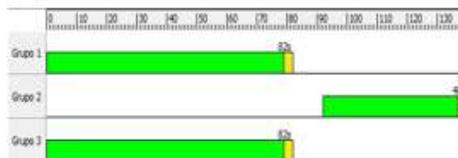


Figura 3-13. Diagramas de fase de la primera a la sexta intersección.

Fuente: Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro.



Figura 3-14. Diagramas de fase de la séptima a la decimotercera intersección.

Fuente: Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro.

Finalmente, la última condición operativa a conocer en la vialidad de estudio se refiere a la velocidad máxima a la que los vehículos pueden transitar. La velocidad límite está determinada por las características geométricas de la vialidad, en zonas urbanas se establece de acuerdo al Reglamento de Tránsito Municipal. El tramo de estudio está limitado a una velocidad de 50 km/h.

3.2.2 Recopilación de datos con el vehículo flotante

Para recabar la información de campo se emplea el método del vehículo flotante, el cual indica que un vehículo debe realizar el recorrido de la ruta establecida partiendo del punto inicial del itinerario, justo en ese instante, el conductor debe elegir de forma aleatoria un vehículo que se encuentre dentro del flujo para comenzar una persecución a través de la vialidad, buscando replicar las condiciones en las que opera el vehículo observado, quien en todo momento no debe percatarse de que está siendo sujeto de observación.

En caso de que el vehículo observado se desincorpore de la ruta establecida, el conductor inmediatamente deberá elegir de forma aleatoria otro vehículo del flujo y continuar con la persecución hasta llegar al punto final del itinerario. Algunas recomendaciones de acuerdo con diversos autores para la correcta ejecución de este método, es que el vehículo circule a una velocidad media representativa de la flota de vehículos con los que transita, buscando el rebase de tantos vehículos como lo rebasen a él, el conductor debe viajar de acuerdo a su apreciación a la velocidad predominante del flujo del tránsito, en dado caso de que no existan vehículos que perseguir en la vía de estudio, el conductor deberá emplear la técnica del vehículo máximo, la cual establece que el conductor debe viajar al límite de velocidad para la vía en particular, a menos que por alguna razón, las condiciones de tránsito no lo permitan.

El dispositivo colector de datos se instala en la parte delantera del vehículo, preferentemente en el área del tablero para evitar problemas de recepción de señal entre el dispositivo y los satélites disponibles. Una vez que se dispone a comenzar los recorridos se inicia el colector GPS, verificando que reciba señal de al menos cuatro satélites y se encuentre operando sin ningún contratiempo, la pantalla LCD

debe indicar que se ha iniciado correctamente y comienza a mostrar las coordenadas de longitud, latitud y la velocidad instantánea.

El vehículo también se instrumentó con una cámara 360° capaz de generar una visión completa del área circundante para analizar el comportamiento del flujo vehicular de forma visualizar y establecer niveles de densidad a través de todo el corredor mientras se recorre el circuito. La Figura 3-15 muestra el vehículo instrumentado con capacidades de monitoreo del tránsito.



Figura 3-15. Vehículo instrumentado.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

3.3.1 Parámetros del flujo vehicular

Una vez que se tienen los resultados de la recolección de datos en campo, es necesario ordenar y realizar algunos procesos para que puedan ser analizados. Por eso se coloca la información registrada de las velocidades en un orden definido de menor a mayor para agrupar los registros y de esta forma, facilitar el análisis de los datos obtenidos.

Los registros de la velocidad se almacenan a cada segundo con el vehículo flotante mientras se realizan los recorridos mínimos necesarios con base en el número de muestras que permita caracterizar las condiciones del flujo en el corredor, la cual consiste en representar las interacciones de las unidades que circulan en el tránsito que pasa por las secciones durante el periodo de estudio.

La estadística debe ser empleada en el análisis de los datos de la velocidad, debido a la incertidumbre que existe en la caracterización de la población, ya que no todos los vehículos viajan a la misma velocidad, ya sea por condiciones de la vialidad como sus propiedades geométricas, operativas o características propias de cada vehículo, por consiguiente, se obtiene una distribución de velocidades dentro de un amplio intervalo de comparación. Por lo anterior, empleando el método del vehículo flotante se busca que se representen las condiciones medias a las que se comporta el flujo vehicular. A continuación, se muestra la distribución de frecuencias de la velocidad en la Tabla 3-12.

Tabla 3-12. Distribución de frecuencias de la velocidad.

Intervalos de clase		Marca de clase (km/h)	Frecuencia observada	Frecuencia acumulada	hi	Frecuencia observada (%)	Frecuencia acumulada (%)
Lím Inf. (km/h)	Lím Sup. (km/h)						
5.00	10.00	8	186	186	0.09	9.46	9.46
11.00	16.00	14	256	442	0.13	13.01	22.47
17.00	22.00	20	161	603	0.08	8.19	30.66
23.00	28.00	26	206	809	0.10	10.47	41.13
29.00	34.00	32	291	1100	0.15	14.79	55.92
35.00	40.00	38	345	1445	0.18	17.54	73.46
41.00	46.00	44	278	1723	0.14	14.13	87.60
47.00	52.00	50	194	1917	0.10	9.86	97.46
53.00	58.00	56	34	1951	0.02	1.73	99.19

59.00 64.00 62 16 1967 0.01 0.81 100.00

Fuente: Elaboración propia.

Basada en los datos obtenidos de 1967 puntos generados en los recorridos del circuito Zaragoza, se muestra el Histograma de frecuencias de velocidad en la Figura 3-16, esto con la finalidad de representar de manera gráfica un panorama de la distribución de la muestra representando en el eje horizontal la velocidad en km/h y la frecuencia absoluta en el eje vertical.

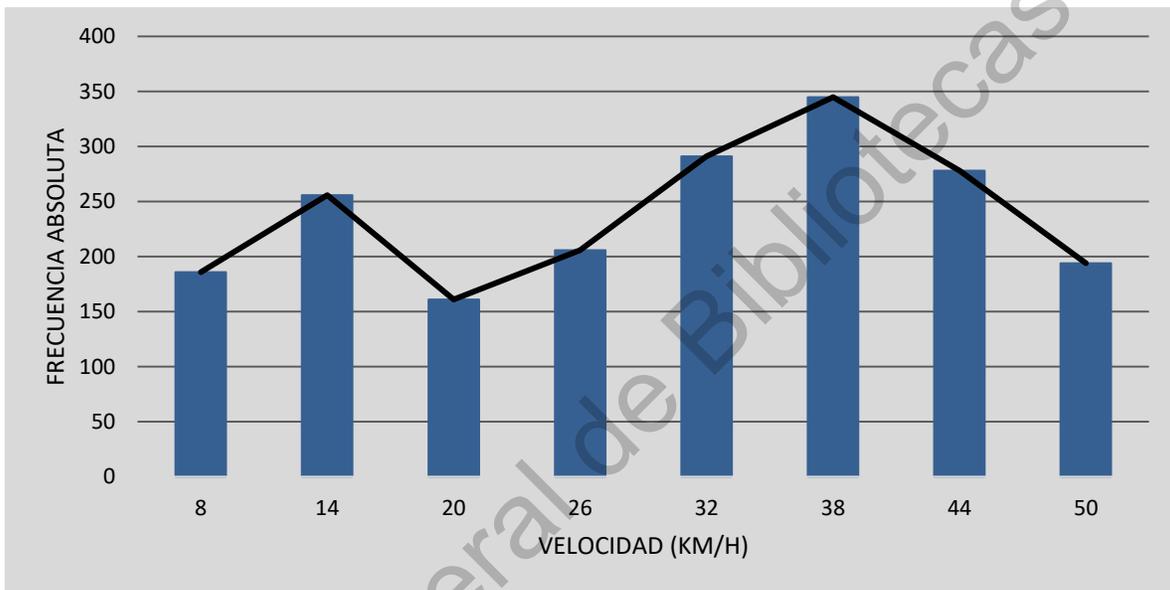


Figura 3-16. Histograma de velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

En muchos estudios de tránsito suelen determinarse valores específicos de la frecuencia acumulada que son empleados para el análisis del comportamiento del flujo vehicular en determinada sección y posteriormente diseñar o realizar las adecuaciones requeridas en la geometría y operación de las vialidades para que sean más eficientes y seguras. Los denominados percentiles se emplean como una medida de posición, en la que una vez ordenados los datos de menor a mayor podemos determinar el valor de la variable por debajo del cual se encuentra

cualquier porcentaje de los datos obtenidos en el muestreo, la Figura 3-17 muestra la ojiva de frecuencia acumulada de la variable de la velocidad.

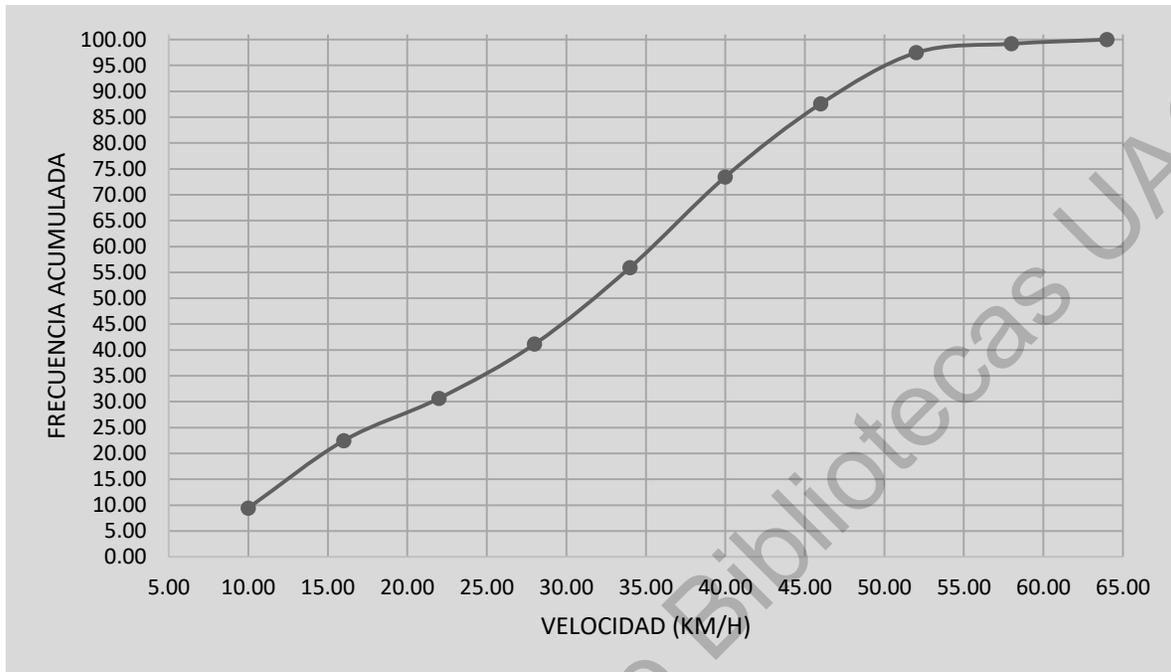


Figura 3-17. Ojiva de frecuencia acumulada de la velocidad.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se realiza la estadística descriptiva para caracterizar el conjunto de datos, se obtienen el primer parámetro a emplear que servirá como base para representar el comportamiento del flujo vehicular en la vialidad de estudio. Los resultados del análisis de velocidad se muestran en la Tabla 3-13.

Tabla 3-13. Resultados del análisis de velocidad.

Análisis de velocidades del corredor Zaragoza		
Parámetro estadístico	Unidad	Km 0+000 al 2+670
Ambos sentidos		
Tamaño de la muestra	Puntos	1967
Velocidad media temporal	Km/h	29.92
Desviación estándar	Km/h	13.70
Moda	Km/h	31.11
Mediana	Km/h	31.82

Velocidad Mínima	Km/h	5.04
Velocidad Máxima	Km/h	62.23
P-15	Km/h	11.45
P-50	Km/h	31.82
P-85	Km/h	44.79
P-98	Km/h	53.18
Error estándar de la media	Km/h	0.309023
Constante K (N.Conf 95)		2
Vt-KE	Km/h	29.3029
Vt+KE	Km/h	30.5390
Límite de velocidad	Km/h	50
Excede límite de velocidad	Km/h	0.0477

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener el indicador de densidad se realizó un experimento de simulación en una vialidad de tres carriles, empleando el porcentaje de verde con el que opera la intersección de la Avenida Ignacio Zaragoza y la Calle Ezequiel Montes ya que el punto donde se presenta el mayor volumen a lo largo del corredor. En este proceso se aumentó la demanda de forma gradual para analizar las diversas condiciones de saturación del flujo vehicular. Los resultados se reportan en el histograma de densidad que se muestra a continuación como la Figura 3-18.

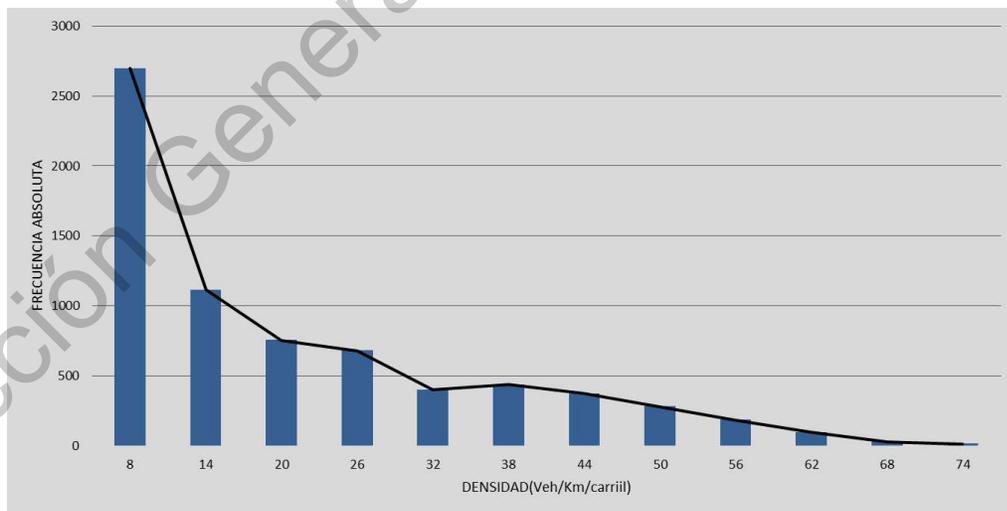


Figura 3-18. Histograma de densidad.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se obtiene el histograma, se realiza el análisis estadístico para obtener los valores con lo que se cargará el modelo de lógica difusa, los valores se muestran en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14 Resultados del análisis de densidad.

Parámetro estadístico	unidad	Análisis de densidad
		Ambos sentidos
Tamaño de la muestra		7076
Densidad media	veh	19
Desviación estándar	veh	16
Moda	veh	1
Mediana	veh	15
Mínimo	veh	1
Máximo	veh	73
P-15	veh	3
P-50	veh	15
P-85	veh	39
P-98	veh	59
Error estándar de la media	veh	0.20
Constante K (N.Conf 95)		2
Vt-KE	veh	18.92
Vt+KE	veh	19.71
Límite de velocidad	veh	50
Excede límite de velocidad	veh	1%

Fuente: Elaboración propia.

También se presenta de manera ilustrativa en la Figura 3-19 los diversos escenarios que se generaron en el experimento de densidad. Logrando determinar rangos de densidad en alto, medio y bajo.

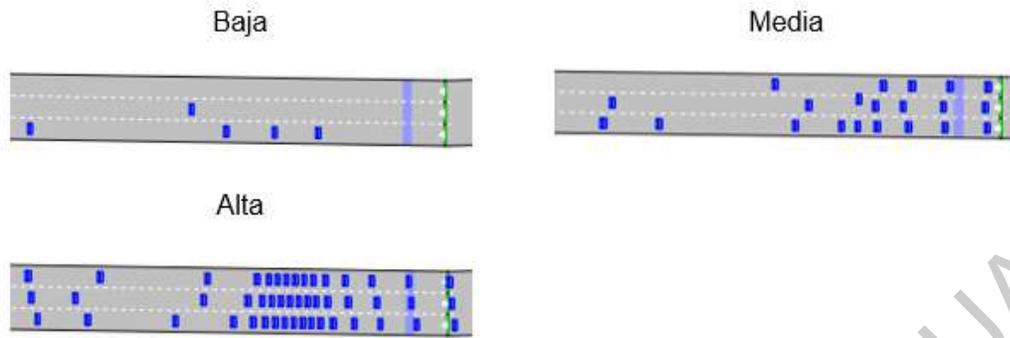


Figura 3-19. Niveles de densidad.

Fuente: Elaboración propia.

La densidad de campo se determina a través de la implementación de una cámara 360° para poder realizar un conteo de vehículos por inspección visual, mientras se llevan a cabo los recorridos se genera una relación entre la velocidad y la densidad. En las Tablas 3-20 a 3-22 se muestran algunas tomas para los distintos grados de densidad, comenzando con la densidad baja cuando prácticamente el vehículo puede viajar a la velocidad máxima permisible en la vialidad sin ningún obstáculo que limite estas condiciones, y finalizando con una alta densidad, donde los vehículos se ven limitados para realizar movimientos, generando mayores tiempos de demora a lo largo de los recorridos.



Figura 3-20. Sección del recorrido con densidad baja.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3-21. Sección del recorrido con densidad media.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3-22. Sección del recorrido con densidad alta.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez determinados los volúmenes vehiculares que transitan por el corredor vial, se hace una distribución de frecuencias de estos valores para generar los valores límite de nuestro modelo de lógica difusa. A continuación, se presenta la ojiva de distribución de frecuencias en la Figura 3-23, mediante la cual, se

determinan los rangos en función de los puntos más congestionados a los que da servicio el corredor.

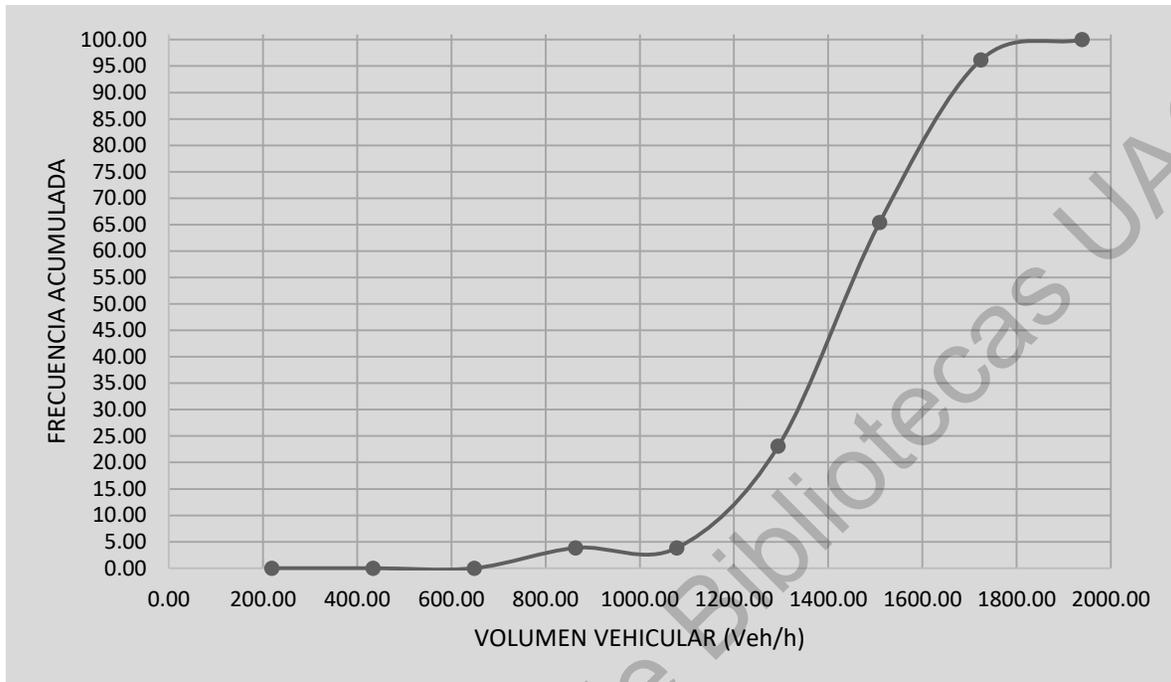


Figura 3-23. Ojiva de frecuencias de los volúmenes vehiculares del corredor Zaragoza.

Fuente: Elaboración propia.

En esta Figura, se puede observar que el valor máximo registrado supera los 1900 veh/h, sin embargo, el valor que se consideró como valor de un grado de saturación alto fue el Percentil 85, con un valor ligeramente superior a los 1600 veh/h.

Para determinar la tasa de flujo de saturación se emplean 13 factores que afectan la capacidad de la intersección con sistema de control de tránsito. La Ec. 16 muestra cada uno de los factores que de acuerdo a las condiciones en las que interactúan las unidades en el sistema dinámico, se verá afectada la cantidad de vehículos totales por hora a los que se les puede dar servicio en esa zona.

$$S = s_o N f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{LU} f_{LT} f_{RT} f_{Lpb} f_{Rpb} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde:

S = Tasa de flujo de saturación (veh/h),

S_o = Flujo de saturación base (vehL/carril/h)

N = número de carriles

f_w = factor de ajuste para ancho del carril

f_{HV} = factor de ajuste para vehículos pesados

f_g = factor de ajuste por pendiente

f_p = factor de ajuste por actividad de estacionamiento

f_{bb} = factor de ajuste por paradas de autobús

f_a = factor de ajuste para el tipo de área

f_{LU} = factor de ajuste para la utilización del carril

f_{LT} = factor de ajuste para giro izquierdo

f_{RT} = factor de ajuste para giro derecho

f_{Lpb} = factor de ajuste peatonal para movimientos de giro a la izquierdo

f_{Rpb} = factor de ajuste de la bicicleta peatonal para movimientos de giro derecho

La Tabla 3-15 presenta algunos de los datos característicos de la vialidad de estudio con la que posteriormente se realizara el análisis para el cálculo de la tasa de saturación.

Tabla 3-15. Datos de la intersección de estudio para el análisis de capacidad

Datos	Unidades
Flujo de saturación base (S_o)	1900 vehL/carril/h
Número de carriles (N)	3.00

Ancho de carril (w)	3.60 m
Vehículos pesados (HV)	6.21 %
Longitud del tramo (L)	178 m
Variación de altura (Δh)	30.00 m
Pendiente media	1.15 %
Vehículos estacionados (Nm)	40
paradas de autobús (Nb)	107
Tipo de Zona:	Comercial
Verde efectivo	92.00 s
Ciclo	140.00 s

Fuente: Elaboración propia.

El primer factor indica el flujo de saturación base (S_0) que de acuerdo con el manual, para una población mayor a 250,000 habitantes es de 1900 vehículos/carril/hora. Se considera este valor ya que el Municipio de Querétaro en 2015 según datos del INEGI, contaba con 878,931 habitantes y el Secretario Técnico del Consejo Estatal de la Población, Juan Carlos Ocegüera Mendiza, afirma que en los últimos años se ha presentado una tasa de crecimiento del 1.82%.

El segundo factor (N), se refiere al número de carriles, en este caso consideramos tres, ya que es el número predominante en todo el circuito, omitiendo algunas zonas donde existen cuatro carriles ya que estos carriles son exclusivos para realizar maniobras de giro. El tercer factor por ancho de carril (f_w) se considera de uno, de acuerdo con la Tabla 3-16, ya que el ancho de carril oscila entre los 3.40 m y los 3.60 m a lo largo de todo el corredor.

Tabla 3-16. Factor de ajuste por ancho de carril.

Ancho de carril (m)	Factor de ajuste de carril (f_w)
<3.0	0.96
$3.0 \leq ac \leq 3.92$	1
>3.92	1.04

Fuente: Highway Capacity Manual (2010).

El cuarto factor (f_{HV}) se determina por el porcentaje de vehículos pesados que para el caso del grupo de carriles es de estudio es de 6.21 % y se calcula con

la Ec. 17, considerando una relación de dos entre los vehículos pesados y ligeros, para el Factor E_T . El quinto factor (f_g), por el efecto de rampas o pendientes y es calculado mediante la Ec. 18. El sexto (f_p) y el séptimo factor (f_{bb}) están relacionados con las paradas generadas en el flujo debido a los movimientos por maniobras de estacionamiento de vehículos y paradas de autobús, y se determinan con las Ec. 19 y 20.

$$f_{HV} = \frac{100}{100 + \% HV(E_T - 1)} \quad (\text{Ec. 17})$$

$$f_g = 1 - \frac{\%G}{200} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$f_p = \frac{N - 1 - \frac{18Nm}{3600}}{N} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$f_{bb} = \frac{N - \frac{14.4N_B}{3600}}{N} \quad (\text{Ec. 20})$$

El factor por tipo de zona (f_a) será de 0.90 para zonas comerciales, según el HCM, el factor por utilización de carriles (f_{LU}) está en función de cuantos los volúmenes total y el más alto del grupo. Los factores de ajuste para giro izquierdo (f_{LT}) y giro derecho (f_{RT}) para carriles exclusivos, será de uno ya que no existe vueltas izquierda y 0.85 para vuelta derecha. Los últimos factores relacionan el cruce de peatones (f_{Lpb}) y ciclistas (f_{Rpb}) para los movimientos de giro izquierdo para el primero y giro derecho para el segundo, con valor de uno, bajo el supuesto de que no existe conflicto con peatones y ciclistas.

Una vez realizados los cálculos y tomando todas las consideraciones, se presenta la Tabla 3-17 donde se registran los resultados para cada uno de los factores de ajuste para el cálculo de la tasa de flujo de saturación obteniendo un total de 2493 veh/h.

Tabla 3-17 Resultados de los factores de ajuste para el cálculo de la tasa de flujo de saturación.

Factor de ajuste	
fw =	1.0000
fHV=	0.9415
fg=	0.9942
fp=	0.9000
fb=	0.8573
fa=	0.9000
flu=	0.6561
fLT=	1.0000
fRT=	0.8500
fLpb=	1.0000
fRpb=	1.0000

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad (C) se determina mediante la Ec. 21 donde S es la tasa de flujo de saturación, g el número de segundos de verde efectivo y ci el ciclo en segundo. Obteniendo así un valor de 1638 veh/h.

$$C = S \left(\frac{g}{c_i} \right) \quad (\text{Ec. 21})$$

3.3.2 Modelo de estimación del tránsito con lógica difusa

Para realizar la coordinación de los sistemas de control del tránsito en muchas ocasiones se cuenta con poca información de la zona, por consiguiente,

suele darse una solución a la problemática de forma aislada. El inconveniente que se tiene con la falta de información, motiva al analista a implementar técnicas que hagan eficiente la poca disponibilidad de datos para dar solución a algunas cuestiones que se presentan al momento de analizar las redes viales.

Los sistemas difusos se introducen para manejar conceptos ambiguos o imprecisos. Su estructura de análisis es asociada comúnmente con la forma en que los seres humanos percibimos el medio que los rodea. Cotidianamente se formulan ideas de manera ambigua y que dependen de quien percibe el suceso, por ejemplo, cuando observamos un vehículo en movimiento se lleva a cabo un tipo de razonamiento aproximado que permite dar cierto grado de pertenencia a cada fenómeno observado, esto nos permite inferir que tan veloz se mueve el vehículo; ¿va muy lento?, lento, a velocidad normal, rápido o muy rápido.

Para la elaboración del modelo se empleó el programa MatLAB, en él se definen las condiciones de entrada y salida que rigen el sistema. Se consideran variables de entrada a la velocidad y la densidad, y la variable de salida a la que denominamos flujo. En este caso hemos empleado el método de inferencia de Mamdani ya que no requiere conocer el modelo matemático que describe la dinámica del sistema y la consecuencia de las operaciones es un conjunto difuso. La defuzzificación se realiza por el método del centroide para poder adecuar los valores difusos generados en la inferencia.

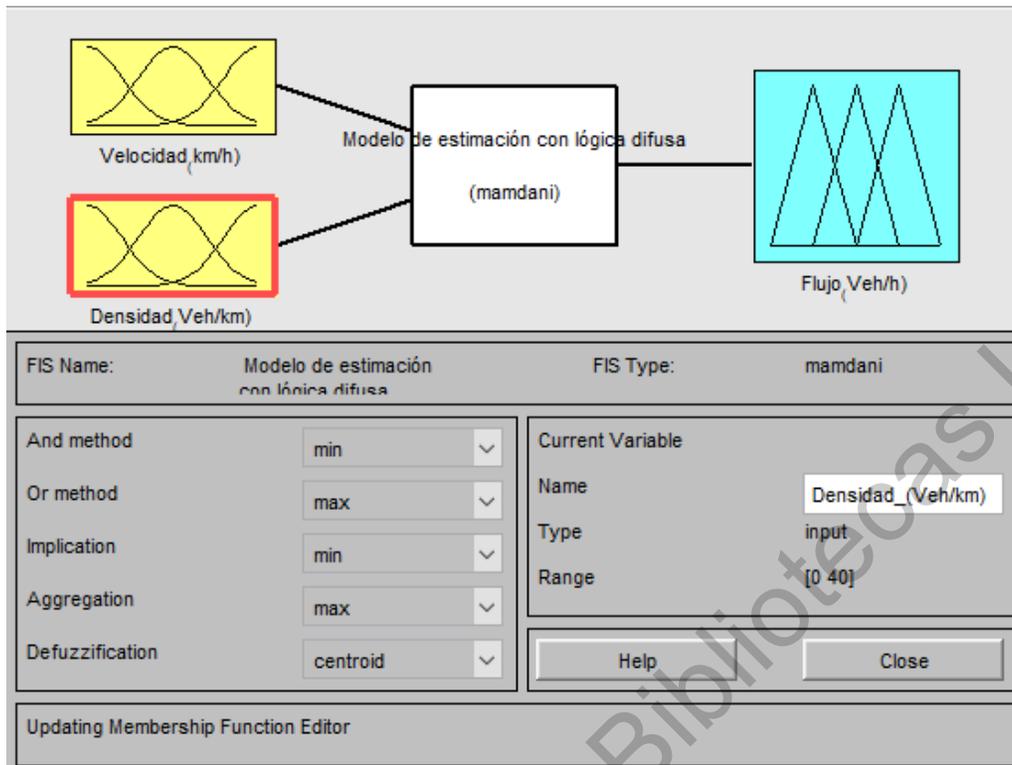


Figura 3-24. Condiciones de entrada y salida para el modelo de lógica difusa.

Fuente: Elaboración propia.

Para cada conjunto difuso se establecen las funciones de membresía del tipo triangular y trapezoidal que representan el grado en que la variable pertenece a un sub conjunto al cual denominamos variable lingüística. Las funciones están basadas en los valores estadísticos obtenidos del estudio de la velocidad en la vialidad, el experimento de simulación para obtener la densidad y de los cálculos realizados para obtener la capacidad máxima de una de sus intersecciones centrales. Las variables lingüísticas empleadas para la función de velocidad son “Baja”, “Media” y “Alta”, como se observa en la Figura 3-25. Las variables lingüísticas para la densidad son nombradas del mismo modo que las de la velocidad.

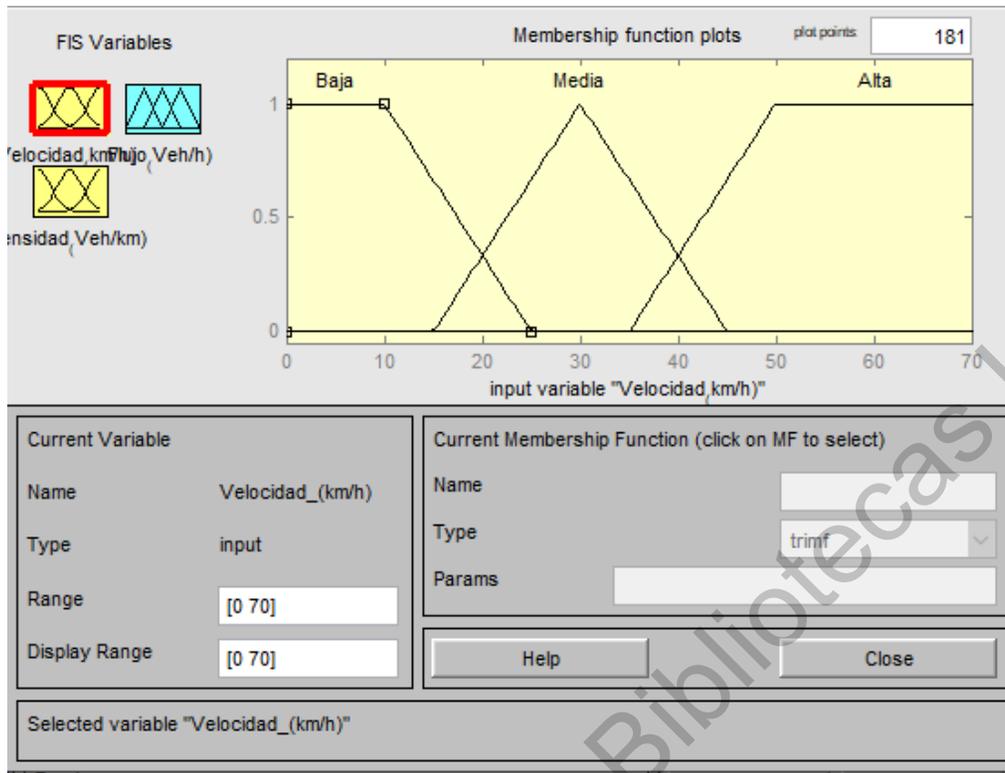


Figura 3-25. Función de membresía para la variable de entrada o condiciones de velocidad

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la función de membresía de salida, la variable del flujo es representada mediante seis variables lingüísticas: Muy bajo, Bajo, Medio, Alto, Muy alto y Saturado como se muestra en la Figura 3-26. El rango de valores va desde cero hasta los 1600 veh/h, que es el valor determinado en el cálculo de la capacidad de la vialidad de estudio.

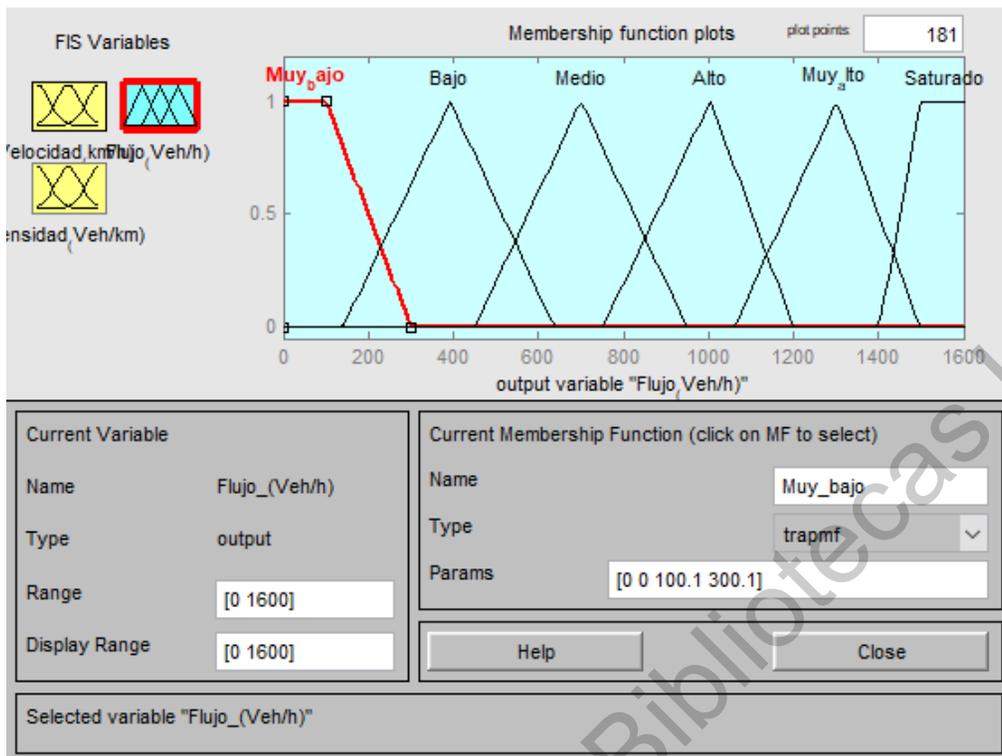


Figura 3-26. Función de membresía para la variable de salida o condición del flujo

Fuente: Elaboración propia.

Las reglas difusas son proposiciones agrupadas que combinan una o más entradas y se les asocia un conjunto difuso de salida. Para modelar el problema que se busca resolver se emplean las preposiciones si-entonces y se asocian a las entradas mediante operaciones lógicas tales como y, o, entre otras. En la Tabla 3-18 se muestran ocho reglas que son la base del modelo en función de la velocidad y la densidad, para posteriormente asociarlo a una curva de control resultante.

Tabla 3-18. Reglas de Fuzificación

Regla	Entradas		Salida
	Velocidad	Densidad	Flujo
1	Alta	Baja	Muy bajo
2	Media	Baja	Muy bajo
3	Baja	Baja	Bajo

4	Alta	Media	Bajo
5	Media	Media	Medio
6	Baja	Media	Alto
7	Media	Alta	Muy Alto
8	Baja	Alta	Saturado

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la interacción entre las variables de entrada y de salida junto con las reglas difusas y los criterios de fuzificación y defuzificación generan una curva de control difuso que se puede observar en la Figura 3-27. En ella se observa en la base las variables de velocidad y densidad que, de acuerdo con su relación entre las reglas programadas, genera determinado flujo hasta llegar a su máxima capacidad en el eje coordenado z.

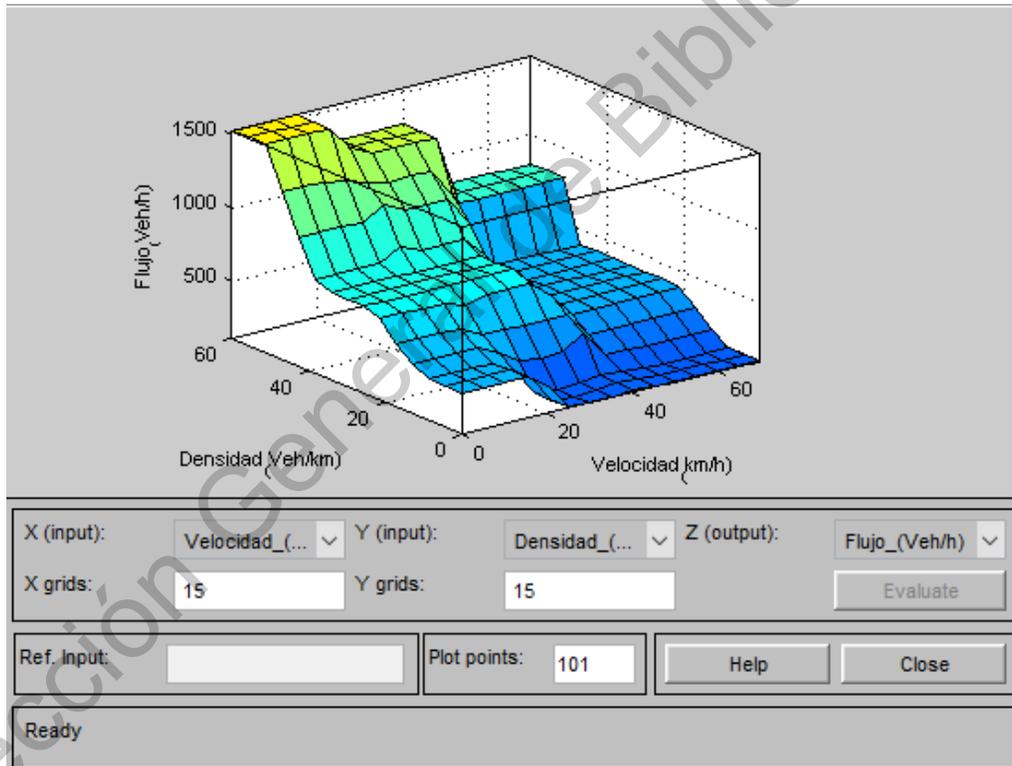


Figura 3-27. Curva de control difuso

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3-28 muestra las reglas del controlador difuso donde se denota gráficamente la inferencia de los conjuntos difusos empleando el método de Mamdani y que muestra que a determinada velocidad y densidad, es posible estimar un valor del flujo relacionando las dos variables anteriores.

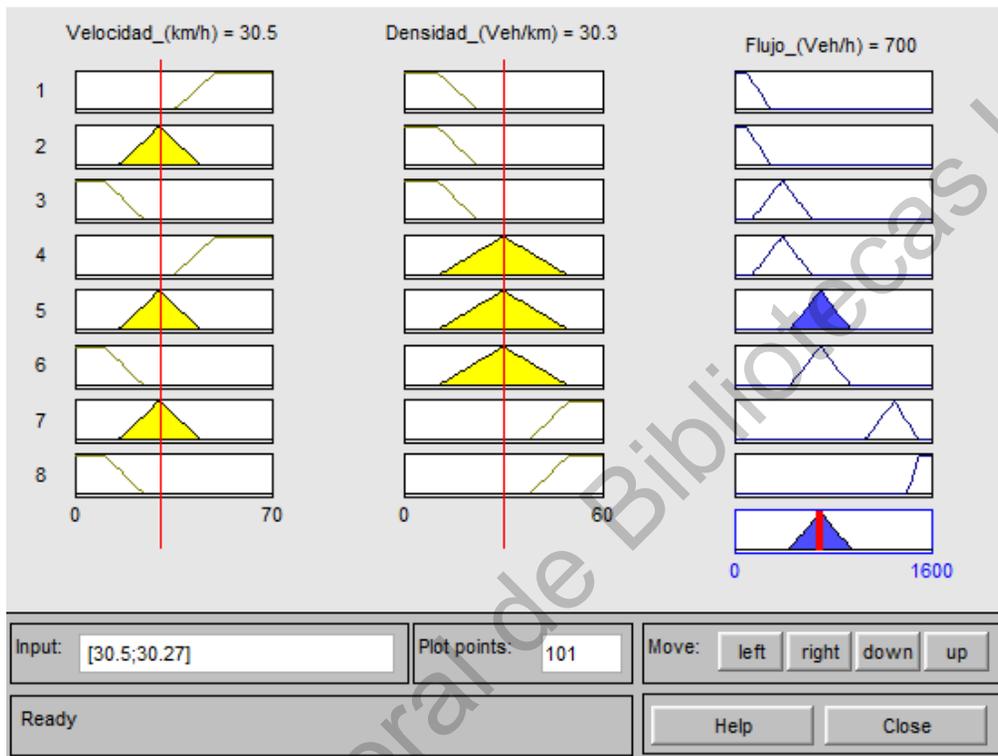


Figura 3-28. Reglas de control difuso por el método de inferencia de Mamdani

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3 Simulación y mejoramiento del sistema de control de tránsito

La simulación del tránsito vehicular es el proceso de diseñar un modelo de un sistema lo más aproximado al real y mediante la cual es posible realizar experimentos que nos permitan comprender el comportamiento del sistema,

también nos permite analizar variaciones en el sistema, aplicando estrategias dentro de determinados criterios o límites para la operación del sistema y observar su comportamiento en función de las modificaciones. Por lo anterior podemos inferir que el uso de la simulación en la problemática planteada, funge como una herramienta para construir un modelo que sirva para analizar el problema del congestionamiento causado por los sistemas de control de tránsito en intersecciones semaforizadas.

Para desarrollar el modelo de simulación se emplean las propiedades geométricas y operativas descritas anteriormente en el apartado 3.2.1, para generar un modelo de simulación del tránsito que describa el comportamiento del sistema actual. Con ello podemos analizar los resultados antes y después de realizar las modificaciones en la operación de los semáforos, de tal forma que podamos contrastar los resultados y aceptar o rechazar la hipótesis establecida.

Para analizar primeramente el escenario de las condiciones antes de las modificaciones en la operación de los semáforos, al cual denominaremos escenario actual, se emplea el programa de simulación Aimsun, basado en las condiciones actuales del sistema, en la Figura 3-29 se muestra parte del corredor Zaragoza en las intersecciones con Juárez Sur y Corregidora, mientras se realiza la corrida de la simulación de tránsito.

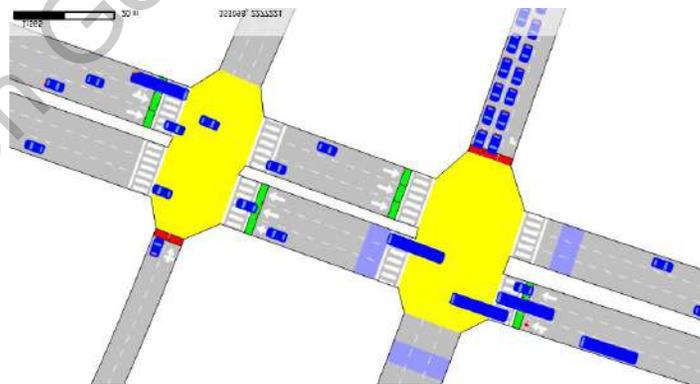


Figura 3-29. Simulación actual, Juárez Sur y Corregidora

Fuente: Imagen generada a partir del programa de simulación Aimsun.

Proponer el mejoramiento del sistema actual no es un problema fácil de resolver, ya que si se desea tener una precisión muy alta, esto implica tener el mayor detalle posible lo cual nos llevaría mucho tiempo y gasto elevado de recursos, por otro lado si no se requiere una precisión tan elevada, se pueden realizar varias suposiciones que pueden ser correctas bajo ciertas circunstancias, ya que trabajar con un circuito de calles muy grande, implica el manejo de muchas variables y que dependiendo del grado de detalle que se maneje en el planteamiento del problema, su resolución puede tornarse muy compleja.

Para realizar el mejoramiento del sistema, se define como función objetivo a la velocidad global del recorrido y a los tiempos de viaje, buscando maximizar la velocidad y minimizar los tiempos de viaje. Se optó por emplear sistemas de control del tránsito de tiempo fijo ya que en las intersecciones donde los patrones de movilidad son constantes o relativamente estables, se facilita la coordinación del sistema de operación en las intersecciones sucesivas con mayor precisión que con los sistemas adaptativos.

Para realizar la coordinación de los semáforos de tiempo fijo, las intersecciones deben estar dentro de un radio no mayor a 800 m entre cada una de ellas. La coordinación de los dispositivos de tiempo fijo se programa generalmente por medio de un control maestro, el cual se encuentra interconectado a controles locales o mediante Sistemas de Posicionamiento Global utilizando tecnología satelital. Así, una vez que se resuelva el problema en el ordenador, será posible implementar las estrategias de control en campo de forma eficaz.

La coordinación de los sistemas de control de tránsito entre intersecciones sucesivas se logra mediante la programación de los cambios de luz verde en función de la velocidad deseada y la distancia entre intersecciones, de tal forma que los vehículos puedan atravesar la vialidad de extremo a extremo a una velocidad constante.

Los métodos basados en el criterio geométrico son denominados con el término de “onda verde”, estas técnicas de coordinación se han posicionado como

soluciones eficientes de bajo costo para realizar el mejoramiento de los sistemas de control de tránsito, especialmente en corredores viales y arterias principales donde se ha logrado la reducción del congestionamiento, la disminución de las demora y puntos de parada, además de aumentar los niveles de comodidad del usuario, gracias a que al conducir a una velocidad determinada sin tener que detenerse a lo largo del corredor, el conductor es capaz de apreciar directamente las ventajas de la coordinación.

A continuación, se muestra la tabla 3-19 donde se determina el sentido en el que será favorecido el flujo del tránsito, es decir, la secuencia sucesiva de semáforos, abrirá paso a los vehículos en el sentido en el que se encuentren los volúmenes más elevados, para conseguir dar paso a lo largo de todo el corredor si el conductor viaja a una velocidad constante de 50 km/h.

Tabla 3-19. Volúmenes horarios de las intersecciones.

Intersección	Volúmen Horario Sentido Oeste - Este	Volúmen Horario Sentido Este - Oeste	Volumen Horario de la calle transversal
Churubusco	1524	715	226
Tecnológico	1387	1245	1664
Ignacio Pérez	1300	1495	643
Nicolás Campa	1508	1252	82
Ezequiel Montes	1931	1615	852
Melchor Ocampo	1148	1280	415
Vicente Guerrero	1277	1164	266
Ignacio Allende Sur	1217	1439	255
Juárez Sur	1515	1168	381
Corregidora	1031	1264	1513
Alameda	1303	1289	0
Luis Pasteur	1314	1531	439 y 284
Manuel Acuña	1069	1421	387

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, el sentido Oeste – Este, presenta el máximo volumen horario en la intersección como Ezequiel montes, además siete de las trece intersecciones cuentan con volúmenes más elevados en este mismo sentido. Bajo estas condiciones, se propone realizar la mejora en el sentido Oeste – Este, en el sistema de semáforos. En la Figura 3-30 se muestra el gráfico Espacio-Tiempo actual en el sentido Oeste-Este.

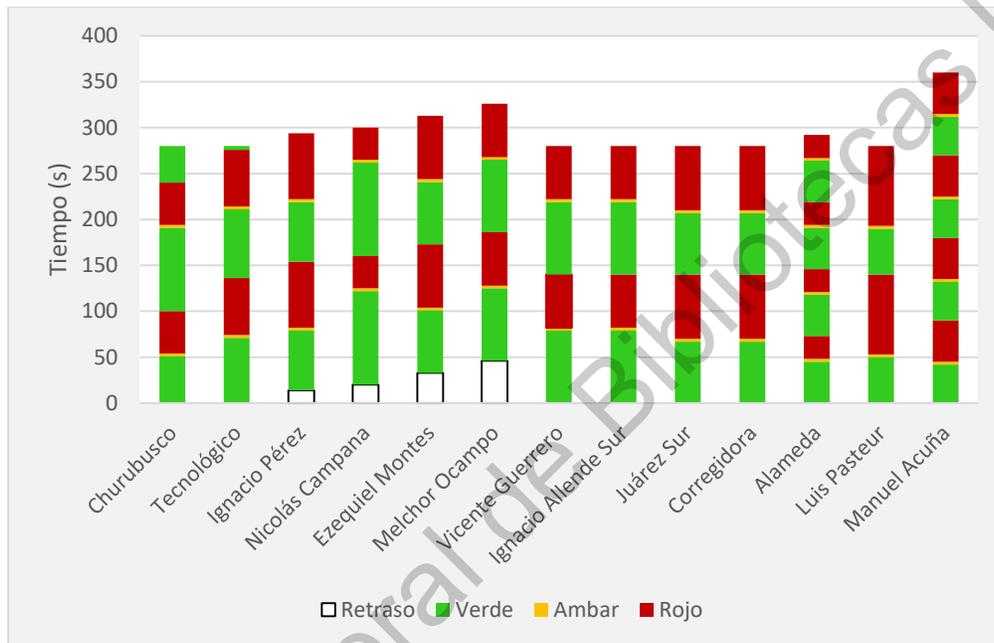


Figura 3-30. Diagrama Espacio-Temporal actual del sentido O-E.

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de desfase (*offset*), se denota como aquel que corresponde al tiempo que le toma a un vehículo ligero recorrer la distancia existente entre dos semáforos sucesivos. De esta forma, el desfase se aplica de tal manera que el vehículo que espera a la señal de verde en la primera intersección (Churubusco) llegue a la siguiente intersección viajando a una velocidad promedio y encuentre la señal de verde, y así sucesivamente hasta donde sea posible permitir un flujo constante en el tránsito.

Considerando una velocidad uniforme de viaje de 50 km/h, que es la permitida actualmente en el corredor Zaragoza, se puede calcular el tiempo (t) mediante la siguiente expresión:

$$t = \frac{e}{V} \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde:

E: es la distancia existente entre semáforos consecutivos (km)

V: velocidad uniforme (km/h)

En la tabla 3-20 se muestran las distancias entre cada intersección y los tiempos de desfase en segundos, calculados para realizar la sincronización del sistema de semáforos.

Tabla 3-20. Cálculo del tiempo de desfase.

Puntos de Control	Cadenamiento en sentido Poniente Oriente	Cadenamiento en sentido Oriente Poniente	Distancia entre intersecciones	t (s) = e/V	Acumulado
Churubusco	0+000	2+277	384	16	0
Tecnológico	0+250	2+038	250	18	34
Ignacio Pérez	0+540	1+751	290	21	55
Nicolás Campa	0+694	1+595	154	12	67
Ezequiel Montes	0+872	1+419	178	13	80
Melchor Ocampo	1+035	1+255	163	12	92
Vicente Guerrero	1+158	1+131	123	9	101
Ignacio Allende Sur	1+360	0+931	202	15	116
Juárez Sur	1+554	0+739	194	14	130
Corregidora	1+605	0+684	51	4	134
Alameda	1+770	0+521	165	12	146
Luis Pasteur	1+938	0+348	168	13	159
Manuel Acuña	2+293	0+000	355	26	185

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4 Del dispositivo colector de datos GPS

De acuerdo con el análisis estadístico realizado para validar la confiabilidad del dispositivo, se determinó mediante el método estático (resumen de resultados en la Tabla 3-6 y 3-7) que la distancia media al punto de georreferencia fue de 1.14 m para el punto A y 1.55 m para el punto B. El fin para el cual este dispositivo fue elaborado, es el de representar un vehículo de 4.5 m de largo que circula por un carril de al menos 3 m de ancho, por lo cual podemos inferir que, a pesar del error generado por el dispositivo, los datos recolectados cuentan con el nivel de precisión requeridos para cumplir con las condiciones del área que se busca representar. La velocidad se considera de cero para esta prueba debido a que no existe movimiento, basado en lo anterior determinamos que el dispositivo puede presentar un error de hasta 1.06 km/h respecto de la velocidad real, siendo este el valor máximo obtenido en el muestreo.

El número promedio de satélites que se sincronizaron con el dispositivo durante el periodo de muestreo fue de 9 para ambos puntos y se determinó que al menos cinco satélites permanecen sincronizados en todo momento, no obstante, el historial del registro demuestra que recibió señal hasta de 11 satélites a la vez. Para los puntos coordenados el error típico más alto fue de $7.775E-07$ ° y la desviación estándar más grande fue de $1.261E-05$ ° por lo cual determinamos que el grado de dispersión de los valores es bajo.

Concluimos que para la prueba de hipótesis planteada bajo la condición de análisis estático, se rechaza la hipótesis nula del punto A y el punto B, lo que nos permite confirmar que existe equivalencia entre las muestras recolectadas de la longitud y latitud generadas con el dispositivo GPS de elaboración propia, con respecto de las coordenadas geodésicas consideradas como los valores objetivo. A

continuación, se presenta la Figura 3-31 en la que se muestran los intervalos de equivalencia de estas pruebas.

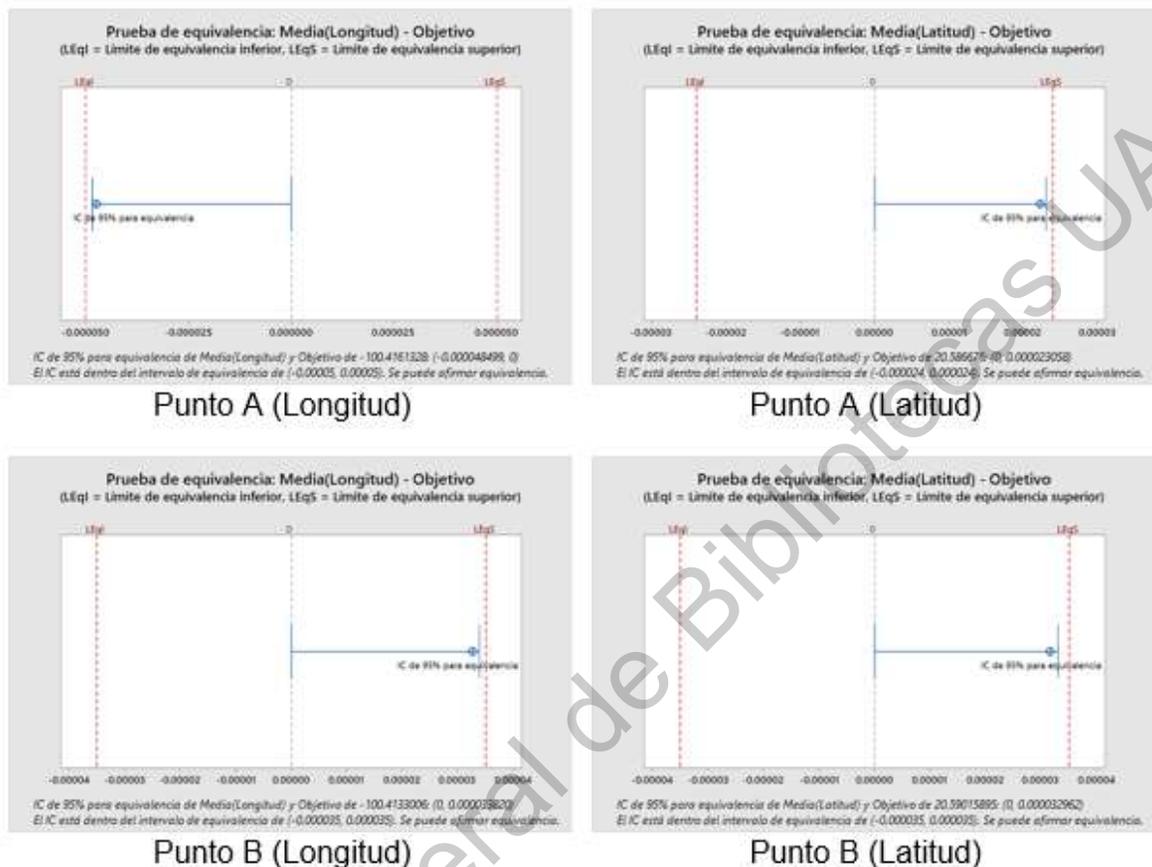


Figura 3-31. Límites de equivalencia del Punto A y Punto B

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de la prueba cinemática se empleó la prueba de equivalencia por pares, con la cual se analizaron las diferencias entre las lecturas recolectadas en movimiento por los dos dispositivos, obteniendo así valores ordenados en pares. Los resultados son mostrados previamente en la Tabla 3-8 con valores muy optimistas, ya que el P-valor en todos los casos fue considerablemente bajo, empleando límites de equivalencia bajos, los cuales se muestran de forma gráfica en la Figura 3-32. Una vez analizada esta información, podemos dar la hipótesis nula por rechazada, concluyendo que la diferencia entre las medias para cada una

de las respectivas variables (velocidad, longitud y latitud) se encuentra dentro del intervalo de equivalencia.

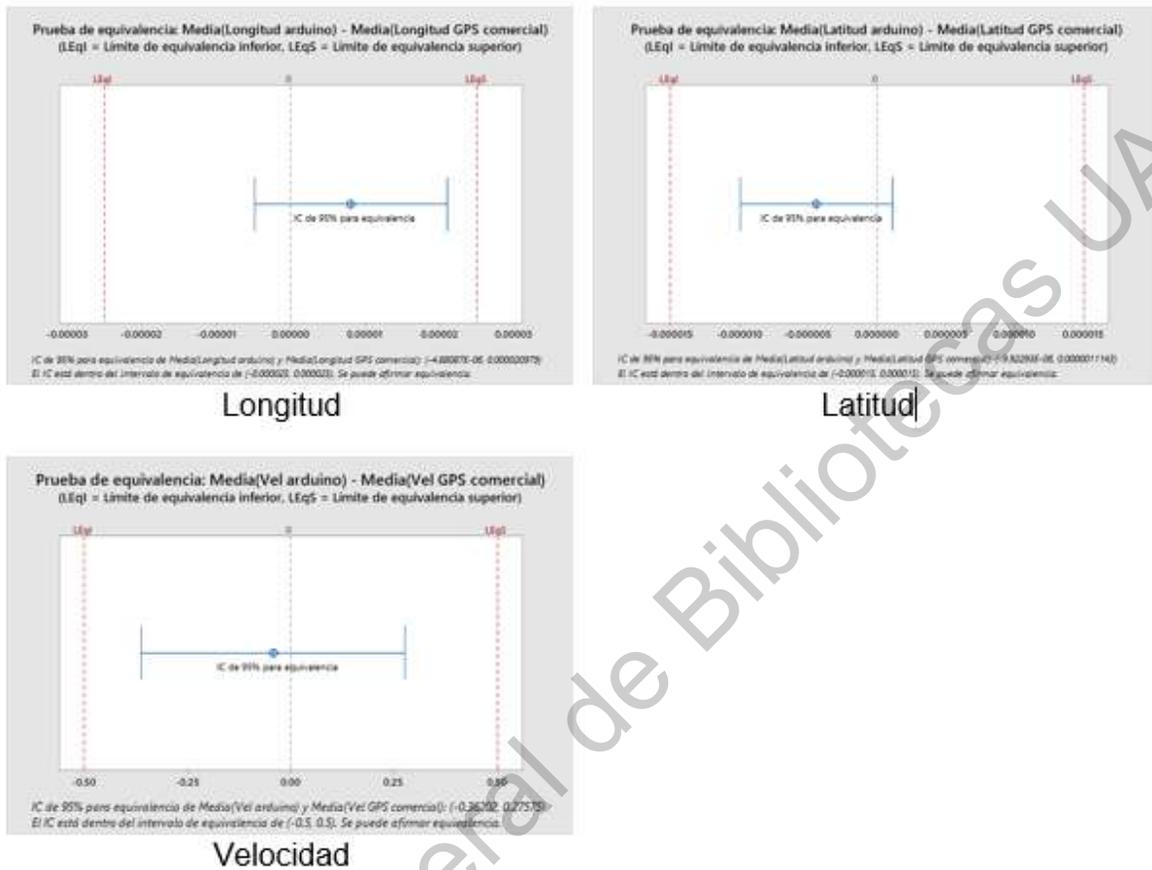


Figura 3-32. Límites de equivalencia de la prueba cinemática

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Del modelo de estimación del tránsito con lógica difusa

Una vez obtenidos los valores del volumen vehicular, velocidad y densidad a partir de la simulación actual, se realiza una comparativa con los volúmenes generados a partir del modelo de estimación de tránsito con lógica difusa. Los resultados se muestran en la Figura 4-1 realizando una comparación del volumen

vehicular obtenido a partir de los dos métodos mencionados. La tabla considera los valores del flujo para las 14 intersecciones de análisis, contemplando únicamente los volúmenes a través del corredor Zaragoza para ambos sentidos, de Poniente a Oriente y de Oriente a Poniente.

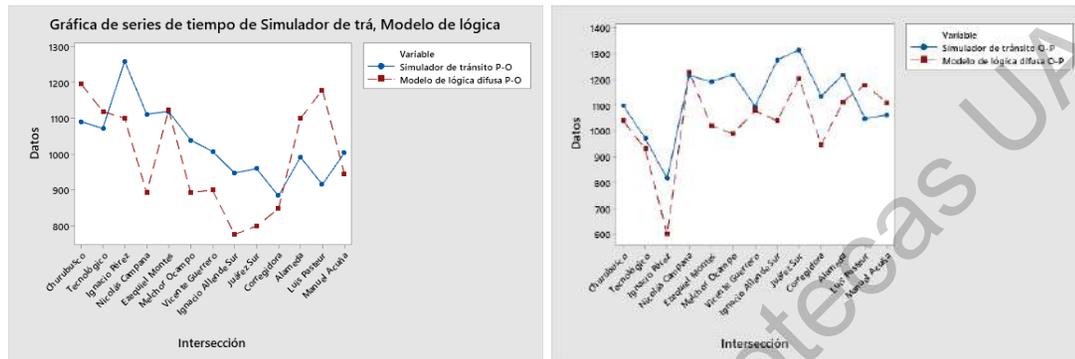


Figura 3-33. Comparación del volumen vehicular obtenido en la simulación y el modelo de estimación con lógica difusa.

Fuente: Elaboración propia.

En función de los datos obtenidos, podemos observar que los flujos generados con el modelo de lógica difusa, logra estimar valores relativamente aproximados a los generados por la simulación, es decir que las reglas difusas con las que se propone el modelo, logran delimitar correctamente la relación entre la velocidad y la densidad para finalmente determinar el flujo de forma aproximada.

3.6 De la simulación de tránsito

Como resultado del procesamiento de los datos en la simulación actual, se obtuvieron 5 condiciones importantes en el comportamiento del flujo vehicular. El primero es el volumen total de vehículos mixtos que se obtuvieron en un periodo de una hora. Este valor se determina en la simulación a través de detectores que cuentan los vehículos que circulan por la red ficticia y los resultados son mostrados

en la Tabla 4-1 para los sentidos correspondientes en cada una de las intersecciones.

Tabla 3-21 Volumen vehicular generado con la simulación de las condiciones antes y después.

Intersección	Volumen vehicular mixto (veh)			
	Poniente-Oriente	Oriente-Poniente	Sur-Norte	Norte-Sur
Churubusco	1092 / 1172	1100 / 924	0	196 / 180
Tecnológico	1072 / 1176	972 / 948	772 / 1156	0
Ignacio Pérez	1260 / 1232	816 / 676	0	468 / 484
Nicolás Campana	1112 / 960	1216 / 1092	85 / 360	0
Ezequiel Montes	1120 / 880	1192 / 1068	0	220 / 224
Melchor Ocampo	1040 / 780	1220 / 1020	392 / 412	0
Vicente Guerrero	1008 / 784	1096 / 992	0	0
Ignacio Allende Sur	948 / 760	1276 / 1180	96 / 240	0
Juárez Sur	960 / 768	1316 / 1200	12 / 84	0
Corregidora	884 / 704	1136 / 1072	1424 / 1464	0
Alameda	992 / 804	1220 / 1148	0	0
Luis Pasteur	916 / 832	1048 / 1160	336 / 352	564 / 376
Manuel Acuña	1004 / 828	1064 / 1276	0	24 / 24

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4-2 se muestran los valores de la densidad promedio generada en la simulación en el escenario actual, se representa en vehículos por hora y se nos sirve para analizar qué tan congestionada esta la intersección en función de sus características geométrica.

Tabla 3-22 Densidad promedio generada con la simulación de las condiciones antes y después.

Intersección	Densidad promedio (veh/km)			
	Poniente-Oriente	Oriente-Poniente	Sur-Norte	Norte-Sur
Churubusco	49.38 / 39.92	34.13 / 35.63	0	32.76 / 32.03
Tecnológico	26.88 / 54.98	121.36 / 90.06	97.89 / 100.03	0
Ignacio Pérez	32.68 / 48.69	15.16 / 14.63	0	19.06 / 19.15
Nicolás Campana	8.83 / 9.24	51.92 / 49.93	0	0
Ezequiel Montes	23.48 / 19.76	25.88 / 33.36	0	13.38 / 12.9

Melchor Ocampo	17.31 / 15.95	30.72 / 39.91	24.88 / 28.12	0
Vicente Guerrero	39.92 / 16.61	41.19 / 34.84	0	0
Ignacio Allende Sur	14.61 / 6.89	13.64 / 11.93	3.94 / 4.29	0
Juárez Sur	33.52 / 11.36	65.46 / 65.12	0	0.27 / 0.4
Corregidora	45.56 / 7.08	30.1 / 21.8	45.58 / 87.41	0
Alameda	31.86 / 6.9	16.98 / 11.41	0	0
Luis Pasteur	101.05 / 34.95	129.04 / 118.4	95.85 / 91.75	67.04 / 91.63
Manuel Acuña	16.34 / 19.12	43.84 / 66.81	0	1.75 / 1.75

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar algunos indicadores en la gestión del tránsito tales como el la velocidad promedio, el tiempo de viaje y las demoras se utiliza la simulación del modelo en Aimsun de las condiciones actuales, que nos permite determinar las condiciones operativas principales de cada intersección, los resultados se muestran en las Tablas 4-3 a 4-5.

Tabla 3-23. Tiempo de demora promedio generado con la simulación de las condiciones antes y después.

Intersección	Tiempo de demora promedio (s)			
	Poniente-Oriente	Oriente-Poniente	Sur-Norte	Norte-Sur
Churubusco	124.38 / 88.65	34.24 / 35.63	0	50.05 / 32.3
Tecnológico	15.55 / 54.98	11.83 / 16.13	22.59 / 26.67	0
Ignacio Pérez	37.04 / 63.8	20.59 / 23.04	0	45.36 / 45.52
Nicolás Campana	1.87 / 2.3	69.03 / 71.33	0	0
Ezequiel Montes	20.02 / 16.41	33.94 / 47.92	0	61.84 / 59.36
Melchor Ocampo	13.56 / 12.83	23.19 / 35.69	46.34 / 51.8	0
Vicente Guerrero	31.64 / 10.02	30.09 / 27.09	0	0
Ignacio Allende Sur	13.48 / 0.86	7.28 / 6.78	28.97 / 32.44	0
Juárez Sur	19.57 / 3.75	13.33 / 14.71	0	13.18 / 23.32
Corregidora	10.47 / 0.27	31.03 / 22.04	82.86 / 87.76	0
Alameda	36.41 / 0.5	12.63 / 6.53	0	0
Luis Pasteur	157.45 / 42.83	29.93 / 25.88	44.78 / 41.25	81.23 / 85.44
Manuel Acuña	25.06 / 30.14	31.24 / 47.99	0	13.37 / 13.37

Fuente: Elaboración propia.

El tiempo de demora promedio denota el retraso o tiempo que permanece parado el vehículo a través de cada una de las intersecciones de análisis. En zonas urbanas es común determinar estos retrasos causados por el cambio del semáforo a luz roja ya que las fases del ciclo semaforico deben regular el paso del flujo de manera alternada, para dar oportunidad a los usuarios que convergen en la intersección a tomar la dirección a la que se dirigen.

Tabla 3-24. Tiempo de viaje promedio generado con la simulación de las condiciones antes y después.

Intersección	Tiempo de viaje promedio (s)			
	Poniente-Oriente	Oriente-Poniente	Sur-Norte	Norte-Sur
Churubusco	148.02 / 112.32	42.99 /	0	55.87 / 49.21
Tecnológico	19.81 / 40.04	12.47 /	23.38 / 23.7	0
Ignacio Pérez	51.93 / 78.69	29.31 /	0	54.38 / 54.55
Nicolás Campana	5.3 / 5.73	79.34 /	0	0
Ezequiel Montes	36.85 / 33.26	40.47 /	0	69.45 / 66.97
Melchor Ocampo	22.32 / 21.6	29.9 /	55.66 / 61.1	0
Vicente Guerrero	38.35 / 16.74	35.03 /	0	0
Ignacio Allende Sur	25.41 / 12.8	18.77 /	39.92 / 43.38	0
Juárez Sur	24.6 / 8.79	15.18 /	0	22.47 / 32.61
Corregidora	12.25 / 2.06	40.42 /	100.42 / 105.32	0
Alameda	46.02 / 10.12	21.53 /	0	0
Luis Pasteur	168.07 / 53.46	31.11 /	45.8 / 42.28	87.27 / 86.42
Manuel Acuña	38.5 / 43.59	36.9 /	0	17.93 / 17.93

Fuente: Elaboración propia.

Determina que tanto tarda un vehículo en llegar de un punto a otro, en este caso de una intersección a otra en condiciones de flujo libre buscando realizar el recorrido a la velocidad máxima deseada y permisible, en contraste con las condiciones en las que la vialidad se encuentra saturada por cuestiones de demanda de infraestructura o por sistemas de control de tránsito no coordinados, se reflejan en el tiempo de viaje de acuerdo a las condiciones operativas en las que se encuentra. Los valores promedio para cada uno de los tramos se muestran en la Tabla 4-5.

Tabla 3-25. Velocidad promedio generada con la simulación de las condiciones antes y después.

Intersección	Velocidad promedio (km/h)			
	Poniente-Oriente	Oriente-Poniente	Sur-Norte	Norte-Sur
Churubusco	21.13 / 22.32	20.31 / 49.07	0	12.22 / 55.02
Tecnológico	34.83 / 12.11	31.43 / 31.99	26.8 / 26.3	0
Ignacio Pérez	28.78 / 18.27	38.26 / 36.15	0	17.63 / 17.83
Nicolás Campana	43.54 / 41.74	16.6 / 18.32	0	0
Ezequiel Montes	24.68 / 25.72	31.83 / 23.86	0	16.07 / 15.79
Melchor Ocampo	41.85 / 41.34	18.41 / 24.35	19.18 / 18.43	0
Vicente Guerrero	25.64 / 42.32	28.29 / 30.3	0	0
Ignacio Allende Sur	39.36 / 50.81	44.22 / 44.16	29.46 / 27.34	0
Juárez Sur	31.69 / 43.11	35.12 / 34.36	0	42.25 / 34.79
Corregidora	43.24 / 51.8	23.14 / 29.11	13.23 / 7.24	0
Alameda	26.9 / 52.04	33.24 / 43.95	0	0
Luis Pasteur	2.94 / 14.79	17.67 / 21.55	11.58 / 13.98	7.9 / 6.96
Manuel Acuña	28.05 / 25.29	11.3 / 8.18	0	26.14 / 26.29

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4-2 se presenta el gráfico Espacio-Temporal del sistema coordinado de semáforos en el sentido de mayor flujo, es decir, el sentido Oeste – Este. En el se observan los retrasos propuestos, para conseguir dar el pase de forma sucesiva a los vehículos. Cabe destacar que no es necesario que todos los semáforos cuenten con el mismo tiempo de fases, para lograr esta sincronización.

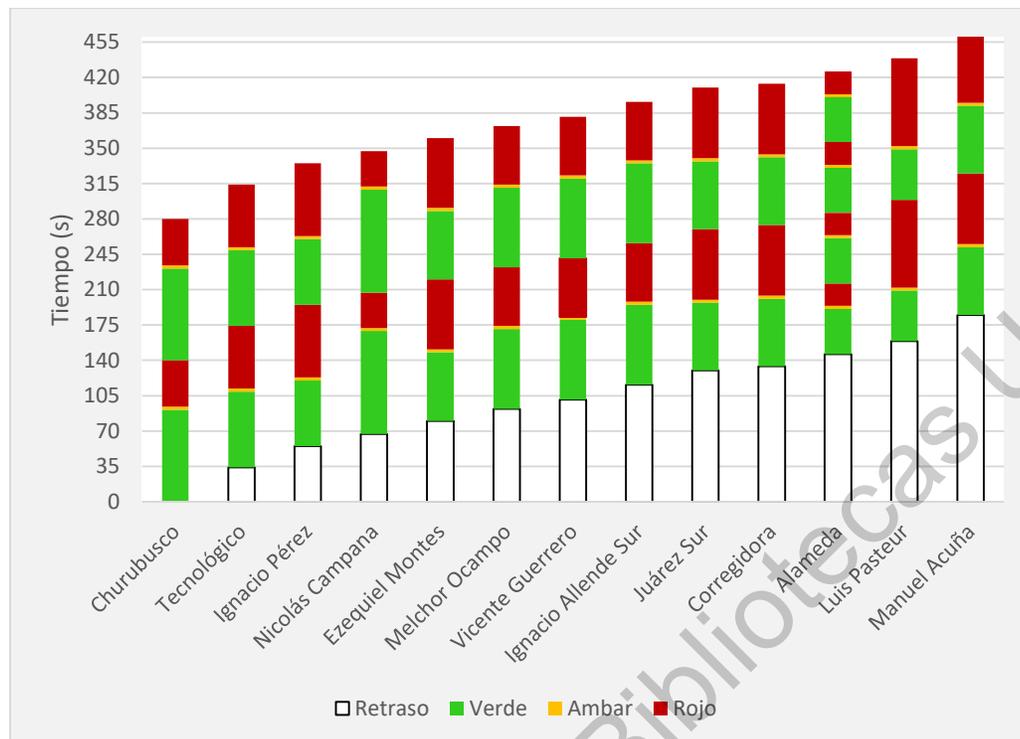


Figura 3-2. Diagrama Espacio-Temporal del sistema de semáforos coordinado en sentido Oeste-Este para una velocidad de 50km/h.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación, empleando el código de programación implementado en el sistema API para la obtención de datos de vehículos flotantes. En este código el proceso es el siguiente: una vez que inicia la corrida de la simulación animada, el sistema envía un vehículo flotante cada cinco minutos y viaja a través de la Av. Ignacio Zaragoza, un vehículo inicia el recorrido en sentido Oriente a Poniente y un segundo vehículo en sentido Poniente a Oriente. El código comienza a recopilar datos de tiempo, distancia y velocidad en intervalos de un segundo, con lo que es posible determinar el tiempo de recorrido y la velocidad global. Los resultados se presentan en la Figura 4-3 a 4-6, los gráficos presentan los recorridos de los vehículos flotantes que transitaron por el corredor Zaragoza, antes y después de la mejora de la operación de los semáforos existentes en las intersecciones de la vialidad.

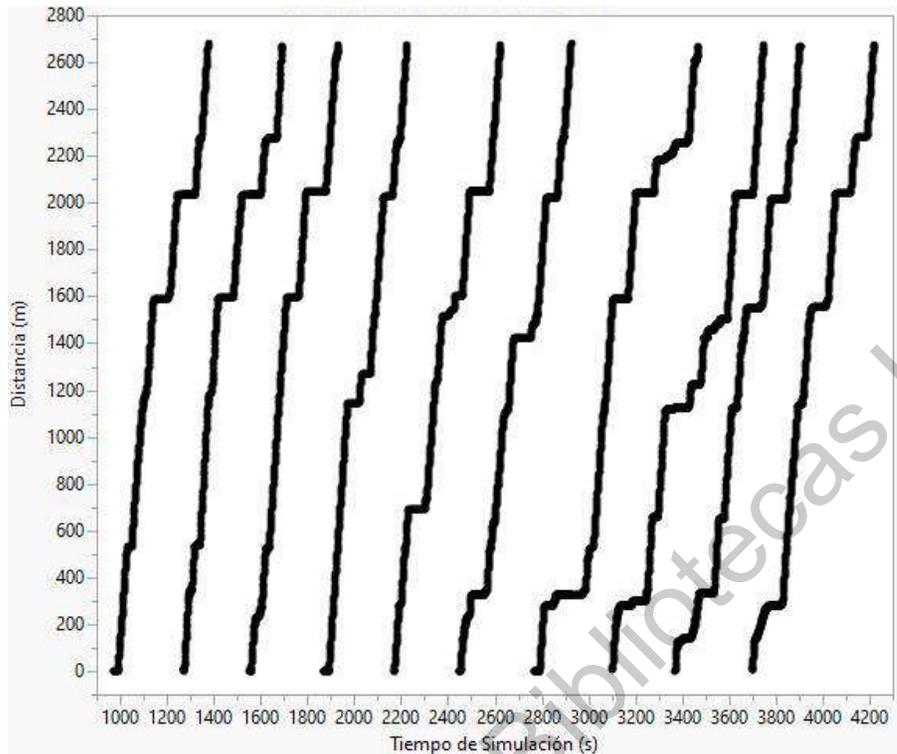


Figura 3-3. Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones antes de la mejora, sentido Oriente-Poniente.

Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico se observan 10 recorridos generados en el simulador de tránsito, comparando el tiempo que duró la simulación, respecto de la distancia recorrida por cada una de los vehículos flotantes, los cuales fueron programados para recolectar información de cada uno de los trayectos. Los escalonamientos mostrados en el gráfico, hacen referencia a los puntos en los que el vehículo permaneció parado en el tránsito.

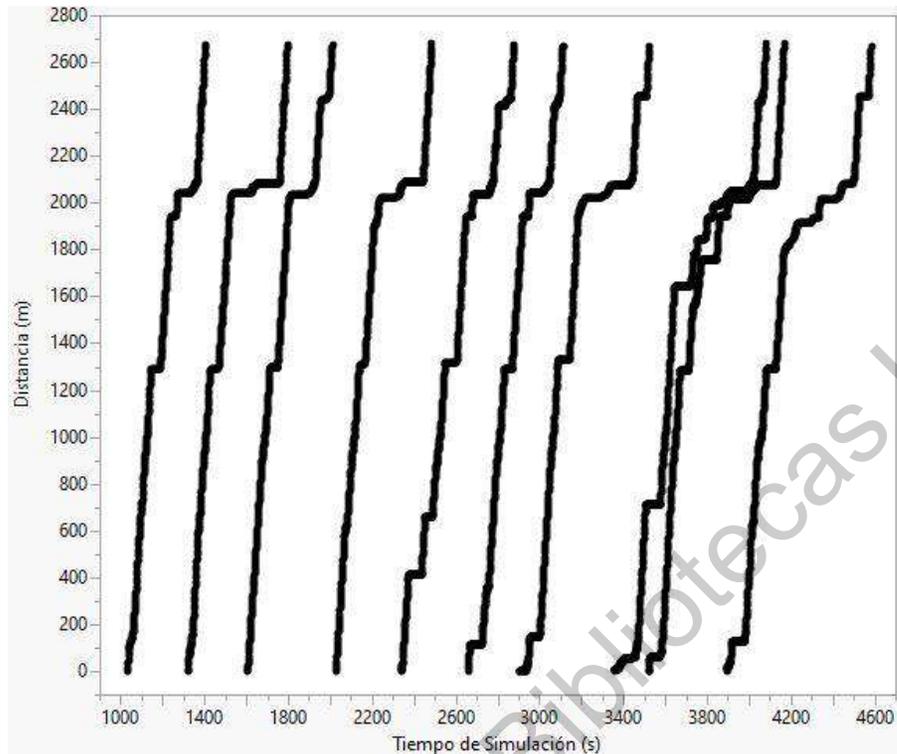


Figura 3-4. Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones antes de la mejora, sentido Poniente-Oriente.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los datos de la condición actual del sistema, se realizó el mejoramiento en la operación del sistema de semáforos, coordinando cada intersección subsecuente en el corredor por el método geométrico, de esta forma el vehículo que cruza a través del corredor, logra cruzar a velocidad uniforme de 50 km/h, de tal manera que consiga circular con la indicación del semáforo en verde las intersecciones subsecuentes, una vez que inicia el recorrido al cambio de luz verde del primer semáforo, reduciendo así el número de paradas.

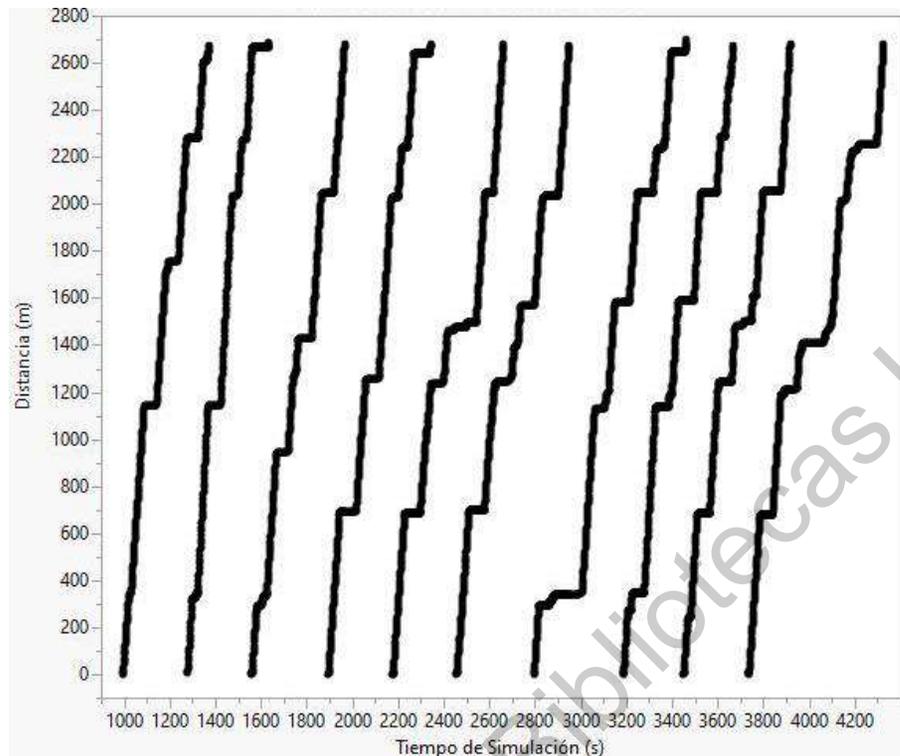


Figura 3-5. Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones después de la mejora, sentido Oriente-Poniente.

Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que los resultados aquí mostrados, se generaron realizando únicamente la coordinación entre intersecciones subsecuentes, por lo cual; las fases, los ciclos y los porcentajes de verde, se mantienen constantes. Lo anterior se consideró para no ver afectada la operación de las calles perpendiculares al corredor, la comparación de estos resultados fue mostrada en las Tablas 4-1 a 4-5.

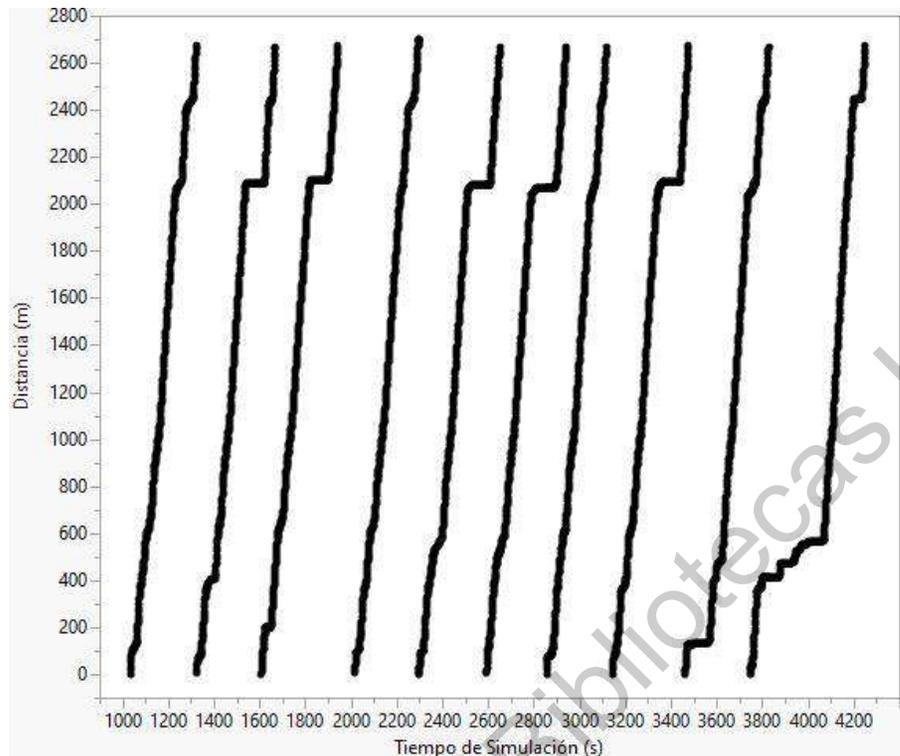


Figura 3-6. Gráfico de recorridos con vehículo flotante en el programa de simulación bajo condiciones después de la mejora, sentido Poniente-Oriente.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente en las Tablas 4-6 y 4-7, se muestran los resultados comparativos de la velocidad global y el tiempo total de recorrido en condiciones antes y después del mejoramiento del sistema de semáforos, para ambos sentidos de circulación.

Tabla 3-26. Comparación de la velocidad global y el tiempo de recorrido para la vialidad Zaragoza, en sentido Oriente-Poniente.

No. Viaje	Condición Actual		Condición de mejora	
	Velocidad Global (km/h)	Tiempo de Viaje (s)	Velocidad Global (km/h)	Tiempo de Viaje (s)
1	23.71	407	25.55	377
2	22.59	425	27.06	357
3	25.44	378	23.58	409
4	27.12	355	21.55	448

5	21.13	455	19.84	484
6	20.18	478	19.49	494
7	13.70	702	14.51	669
8	14.89	646	20.02	481
9	17.96	535	20.61	468
10	18.48	521	16.28	593

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la tabla anterior, podemos determinar que no se ve afectado el sentido de Oriente a Poniente, obteniendo una ganancia del 2 % en la velocidad global y una disminución del 2 % en el tiempo de viaje a pesar de no ser el sentido al que se le da la prioridad en la mejora. Analizando los viajes con las velocidades mas bajas registradas, el sistema mejorado obtiene una ganancia del 6 % entre los viajes de la iteración siete en ambos escenarios.

Tabla 3-27. Comparación de la velocidad global y el tiempo de recorrido para la vialidad Zaragoza, en sentido Poniente-Oriente.

No. Viaje	Condición Actual		Condición de mejora	
	Velocidad Global (km/h)	Tiempo de Viaje (s)	Velocidad Global (km/h)	Tiempo de Viaje (s)
1	26.07	369	33.31	289
2	20.30	474	27.87	344
3	23.87	403	28.63	336
4	21.10	457	34.32	283
5	17.94	537	26.93	356
6	21.27	452	27.58	348
7	15.50	619	36.58	262
8	13.30	725	28.91	333
9	14.90	647	26.23	366
10	13.93	689	19.06	504

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del sentido de circulación Poniente a Oriente, se realiza el mismo procedimiento, cabe mencionar que este es el sentido por el que se optó realizar la mejora del sistema, logrando una ganancia del 54 % en la velocidad global y una disminución de los tiempos de recorrido del 36 %. Lo anterior es determinado

de los valores promedio de los recorridos antes y después de la mejora. Finalmente, se realiza el promedio de los viajes de ambos sentidos y se consigue obtener un aumento en las velocidades de 26.57 % y una disminución de los tiempo de recorrido del 20.18 %, con lo que podemos determinar cómo valida la hipótesis planteada.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se elaboró un modelo de estimación del tránsito para zonas urbanas mediante un sistema de inferencia difusa, para un corredor vial de tres carriles que cuenta con un sistema de control de tránsito. La finalidad de obtener esta estimación, es la de generar flujos en cada una de las secciones del corredor, para realizar simulaciones del comportamiento del tránsito que permiten analizar la coordinación entre semáforos subsecuentes que regulan el paso de los vehículos, y de esta forma realizar un mejoramiento en el sistema operacional de la red.

La velocidad de recorrido es un parámetro que mide la eficiencia operativa de las redes viales, los sistemas de semáforo de tiempo fijo comúnmente suelen programarse de forma aislada, esto genera que el sistema global de la red se encuentre descoordinado causando retrasos en los viajes, aumentando los tiempos de demora y disminuyendo la velocidad de recorrido. Por esto se propone realizar estrategias integrales de monitoreo del tránsito para garantizar la coordinación del sistema.

La recolección de datos suele ser una tarea que requiere de un gran esfuerzo, tiempo y recursos económicos, el sistema de monitoreo del tránsito está basado en el método del vehículo flotante, buscando obtener indicadores que logren darnos un panorama general de la operación de los corredores viales, para este caso establecimos como tales, la velocidad y la densidad. Para esto se empleó un dispositivo colector de datos GPS de elaboración propia, mediante el cual se registra la posición y la velocidad del vehículo a cada segundo. Para obtener un valor de la densidad que se presenta en las secciones mientras se realizan los recorridos, el vehículo también se instrumentó con una cámara 360°, de esta forma, se logra determinar este parámetro mediante inspección visual.

El modelo de estimación del tránsito basado en lógica difusa se caracteriza por obtener un valor numérico que indica la cantidad de vehículos basado en la capacidad que tienen las intersecciones semaforizadas y la relación de la velocidad

y la densidad característicos de la vialidad de estudio. Para establecer este factor de manera formal, la densidad obtenida mediante experimentos de simulación y la velocidad obtenida del monitoreo del tránsito con un vehículo instrumentado, están relacionadas a través de un sistema de inferencia difusa del tipo Mamdani. El sistema asigna un valor del flujo en función de la densidad y la velocidad siguiendo el razonamiento infiriendo que, cuanto menor sea la velocidad y mayor la densidad, será mayor el número de vehículos hasta llegar a un estado de saturación del sistema en la intersección. Por el contrario, cuanto mayor es la velocidad y menor la densidad, se llega a un estado de velocidad deseada en condiciones similares al flujo libre.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el principal hallazgo de esta investigación argumenta que es posible obtener estimaciones cercanas del tránsito, empleando vehículos instrumentados con características de monitoreo con tasas de penetración bajas para estimar indicadores del comportamiento del flujo vehicular. Una característica útil para evaluar los sistemas de control de tránsito para generar estrategias integrales en periodos de tiempo cortos y buscando la reduciendo costos en el proceso de obtención de datos.

Finalmente se logra realizar la mejora del sistema de semáforos obteniendo mejoras del 54 % en la velocidad global y la disminución de los tiempo de recorrido en un 36 %, en el sentido en el que se favorece el flujo de tránsito vehicular empleando el método de la onda verde. Una vez que se realicen nuevos monitorios basados en esta metodología, será posible generar aproximaciones cercanas de las condiciones del tránsito, para realizar los ajustes necesarios en el sistema de semáforos en periodos de tiempo cada vez más cortos.

Los trabajos futuros consistirán en realizar análisis de los flujos para lograr realizar la coordinación de los sistemas de control de tránsito en un lapso de tiempo corto, tendiendo a llegar al tiempo real. Esto con sistemas más sofisticados de recolección de datos, que logren transmitir su posición, tiempo y velocidad en lapsos

muy cercanos al tiempo real. Además, se propone realizar a fondo vialidades de uno y dos carriles para conseguir un modelo de estimación más preciso.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

5. REFERENCIAS

AIMSUN. (2017). Obtenido de <https://www.aimsun.com/aimsun/principales-funcionalidades/>

AlKheder, S., & AlRukaibi, F. (2020). Enhancing pedestrian safety, walkability and traffic flow with fuzzy logic. *Science of The Total Environment*, 701, ISSN 0048-9697. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134454>

Al-Mosaind, M. A. (1998). Freeway traffic congestion in Riyadh, Saudi Arabia: attitudes and policy implications. *Journal of Transport Geography*, 6(4), 263-272. ISSN 0966-6923. doi:[https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(98\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(98)00024-6)

ARDUINO. (2019). Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

Asakura, Y., Kusakabe, T., Nguyen, L., & Ushiki, T. (2017). Incident detection methods using probe vehicles with on-board GPS equipment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 81, 330-341. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.023>

ASOCIATES DUNN ENGINEERING, A., & Systems Siemens Intelligent Transportation, S. (2005). *TRAFFIC CONTROL SYSTEMS HANDBOOK*. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION.

Astarita, V., & Giofré, V. P. (2019). From traffic conflict simulation to traffic crash simulation: Introducing traffic safety indicators based on the explicit simulation of potential driver errors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 94, 215-236. ISSN 1569-190X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.03.003>

Barceló, J. (2010). *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer. ISBN 978-1-4419-6141-9.

Bellavista, P., Foschini, L., & Zamagni, E. (2014). V2X Protocols for Low-Penetration-Rate and Cooperative Traffic Estimations. *2014 IEEE 80th*

Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall). Vancouver, BC, 1-6.
doi:10.1109 / VTCFall.2014.6966225

Bhave, N., Dhagavkar, A., Dhande, K., Bana, M., & Joshi, J. (2019). Smart Signal – Adaptive Traffic Signal Control using Reinforcement Learning and Object Detection. *2019 Third International conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, (págs. 624-628). Palladam, India.
doi:10.1109/I-SMAC47947.2019.9032589

Bigazzi, A. Y., & Figliozzi, M. A. (2013). Marginal costs of freeway traffic congestion with on-road pollution exposure externality. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 57, 12-24, ISSN 0965-8564.
doi:https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.09.008

Bouderba, S., & Moussa, N. (2018). Impact of green wave traffic light system on V2V communications. *2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)* (págs. 1-6). Marrakesh, Morocco: IEEE. doi:10.1109/WINCOM.2018.8629638

Box, P., & Oppenlander, j. (1985). *Manual de estudios de Ingeniería de Tránsito*. México, D.F.: Representaciones y Servicios de Ingeniería.

Cabezas, X., García, S., & Salas, S. D. (2019). hybrid heuristic approach for traffic light synchronization based on the MAXBAND. *Soft Computing Letters*, 1,100001, ISSN 2666-2221. doi:https://doi.org/10.1016/j.socl.2019.100001

Cal y Mayor, R., & Cardenas, J. (2007). *Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. México, D.F.: Alfaomega.

Calvert, S. C., & Arem, B. v. (2020). A generic multi-level framework for microscopic traffic simulation with automated vehicles in mixed traffic. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 110, 291-311. ISSN 0968-090X.
doi:https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.11.019

Casadei, G., Bertrand, V., Gouin, B., & Canudas-de-Wit, C. (2018). Aggregation and travel time calculation over large scale traffic networks: An empiric study on the Grenoble City. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 713-730. ISSN 0968-090X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.033>

Ceballos, F. (2010). *JAVA 2 Curso de Programación*. Madrid: RA-MA.

Çeven, S., Albayrak, A., & Bayır, R. (2020). Real-time range estimation in electric vehicles using fuzzy logic classifier. *Computers & Electrical Engineering*, 83, ISSN 0045-7906. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106577>

Chatterjee, K., De, A., & Chan, F. (2019). Real time traffic delay optimization using shadowed type-2 fuzzy rule base. *Applied Soft Computing*, 74, 226-241. ISSN 1568-4946. doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.10.008>

Chen, C., Liu, X., Qiu, T., & Sangaiah, A. K. (2020). A short-term traffic prediction model in the vehicular cyber–physical systems. *Future Generation Computer Systems*, 105, 894-903. ISSN 0167-739X.

Cheng, W., Liu, X., & Zhang, W. (2006). An Optimal Adaptive Traffic Signal Control Algorithm for Intersections Group. *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, (págs. 8683-8686). Dalian. doi:10.1109/WCICA.2006.1713676

Chou, C.-H., & Teng, J.-C. (2002). A fuzzy logic controller for traffic junction signals. *Information Sciences*, 143(1-4), 73-97. ISSN 0020-0255. doi:[https://doi.org/10.1016/S0020-0255\(02\)00199-8](https://doi.org/10.1016/S0020-0255(02)00199-8)

Collotta, M., Lo-Bello, L., & Pau, G. (2015). A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers. *Expert Systems with Applications*, 42(13), 5403-5415. ISSN 0957-4174. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.011>

Cuervo-Pinilla, A., Quintero, M., & Premachandra, C. (2014). Intelligent driving diagnosis based on a fuzzy logic approach in a real environment

implementation. *014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings* (págs. 102-107). Dearborn, MI: IEEE.

Deng, L., Tang, N., Lee, D.-I., Wang, C. T., & Lu, M. C. (2005). Vision based adaptive traffic signal control system development. *19th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'05) Volume 1 (AINA papers)*, (págs. 2, 385-388). Taipei, Taiwan. doi:10.1109/AINA.2005.342

Díaz-Ivorra, C., Díaz-Ivorra, J., Ferreiro-Prieto, I., Pérez-Carrión, T., Serrano-Cardona, M., Tomás-Jover, R., . . . Sentana-Cremades, E. (2002). MÉTODOS GEOMÉTRICOS DE COORDINACIÓN DE INTERSECCIONES REGULADAS POR SEMÁFOROS. *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*. Santander, España: INGEGRAF.

Dimitriou, L., Tsekeris, T., & Stathopoulos, A. (2008). Adaptive hybrid fuzzy rule-based system approach for modeling and predicting urban traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16(5), 554-573. ISSN 0968-090X. doi:https://doi.org/10.1016/j.trc.2007.11.003

Dinopoulou, V., Diakaki, C., & Papageorgiou, M. (2006). Applications of the urban traffic control strategy TUC. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1652-1665, ISSN 0377-2217. doi:https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.032

Gao, S., & Chabini, I. (2006). Optimal routing policy problems in stochastic time-dependent networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40:2, 93-122. ISSN 0191-2615.

Gao, S., & Chabini, I. (2006). Optimal routing policy problems in stochastic time-dependent networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(2), 93-122, ISSN 0191-2615. doi:https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.02.001

- Ge, Q., & Fukuda, D. (2016). Updating origin–destination matrices with aggregated data of GPS traces. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69, 291-312. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.06.002>
- Ghatee, M., & Hashemi, S. (2009). Traffic assignment model with fuzzy level of travel demand: An efficient algorithm based on quasi-Logit formulas. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 432-451. ISSN 0377-2217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.12.023>
- Goryaev, N., Myachkov, K., & Larin, O. (2018). Optimization of “green wave” mode to ensure priority of fixed-route public transport. *Transportation Research Procedia*, 36, 231-236. ISSN 2352-1465. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.072>
- Harrell, C., & Tumay, K. (1997). *Simulation Made Easy: A Manager's Guide*. Engineering & Management Press. ISBN:978-0-89806-136-9.
- Hatri, C., & Boumhidi, J. (2018). Fuzzy deep learning based urban traffic incident detection. *Cognitive Systems Research*, 50, 206-213. ISSN 1389-0417. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2017.12.002>
- Herrera, J., Work, D., Herring, R., Ban, X., Jacobson, Q., & Bayen, A. (2010). Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: The Mobile Century field experiment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4), 568-583, ISSN 0968-090X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.10.006>
- Hou, Q., Leng, J., Ma, G., Liu, W., & Cheng, Y. (2019). An adaptive hybrid model for short-term urban traffic flow prediction. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 527, ISSN 0378-4371. doi:<https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121065>

INEGI. (2017). Encuesta Origen Destino en Hogares de la Zona Metropolitana del Valle de México (EOD 2017). Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/programas/eod/2017/>

INEGI. (2018). Obtenido de https://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=

Javed, M. A., Zeadally, S., & Hamida, E. B. (2019). Data analytics for Cooperative Intelligent Transport Systems. *Vehicular Communications*, 15, 63-72. ISSN 2214-2096.

Kammoun, H., Kallel, I., Casillas, J., Abraham, A., & Alimi, A. (2014). Adapt-Traf: An adaptive multiagent road traffic management system based on hybrid ant-hierarchical fuzzy model. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 42, 147-167. ISSN 0968-090X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.003>

Kaplan, E. D., & Hegarty, C. J. (2005). *Understanding GPS: Principles and Applications*. London: Second Edition. Artech House.

Kong, X., Xu, Z., Shen, G., Wang, J., Yang, Q., & Zhang, B. (2016). Urban traffic congestion estimation and prediction based on floating car trajectory data. *Future Generation Computer Systems*, 61, 97-107. ISSN 0167-739X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.future.2015.11.013>

Li, H., Xu, J., Huang, L., & Lin, P. (2008). Congestion Forecast Model from Integrated GPS/GIS Data Based on Fuzzy Logic and Neural Network. *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application* (págs. 311-315). Shanghai, China: IEEE. doi:10.1109/IITA.2008.393

Liu, H., Lu, X.-Y., & Shladover, S. E. (2019). Traffic signal control by leveraging Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) vehicle platooning capabilities.

Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 104, 390-407.
ISSN 0968-090X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.05.027>

Liu, K., & Fei, X. (2010). A fuzzy-logic-based system for freeway bottleneck severity diagnosis in a sensor network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4), 554-567. ISSN 0968-090X.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2009.11.002>

Matín del Brío, B., & Sanz-Molina, A. (2002). *Redes Neuronales y Sistemas Difusos*. 2da edición: Alfaomega Ra-Ma.

Medina, P. (2007). *Estudio del desempeño del motor de inducción usando un controlador difuso*. Quito: Escuela Politécnica Nacional de Quito.

Murat, Y. (2006). Comparison of fuzzy logic and artificial neural networks approaches in vehicle delay modeling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 14(5), 316-334. ISSN 0968-090X.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.08.003>

Murat, Y., & Gedizlioglu, E. (2005). A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(1), 19-36. ISSN 0968-090X.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.12.004>

Nagatani, T. (2007). Vehicular traffic through a sequence of green-wave lights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 380, 503-511. ISSN 0378-4371. doi:<https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.02.072>

Najafi, S., Flintsch, G., & Khaleghian, S. (2016). Fuzzy logic inference-based Pavement Friction Management and real-time slippery warning systems: A proof of concept study. *Accident Analysis & Prevention*, 90, 41-49. ISSN 0001-4575. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.007>

OMS. (2016). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

ÖZDEMİR, Z., & TUĞRUL, B. (2019). Geofencing on the Real-Time GPS Tracking System and Improving GPS Accuracy with Moving Average, Kalman Filter and Logistic Regression Analysis. *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*,. Ankara, Turkey. 1-6.

Patire, A., Wright, M., Prodhomme, B., & Bayen, A. (2015). How much GPS data do we need? *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58(B), 325-342. ISSN 0968-090X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.011>

Piórkowski, M., Raya, M., Lezama-Lugo, A., Papadimitratos, P., Grossglauser, M., & Hubaux, J.-P. (2008). TraNS: Realistic Joint Traffic and Network Simulator for VANETs. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*. doi:10.1145/1374512.1374522

Rajak, B., Mallick, S., & Kushwaha, D. (2020). Creating a Dynamic Real Time Green Corridor and Assessing its Impact on Normal Traffic Flow. *Procedia Computer Science*, 171, 2-11. ISSN 1877-0509. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.002>

Reyes-Spíndola, R. C., & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. México, D.F.: Alfaomega. 597pp ISBN:970-15-1238-3.

Romana, M., Nuñez, M., Martínez, J. M., & Diez de Arizaleta, R. (2017). *Manual de Capacidad de Carreteras HCM 2010*. Madrid : Fundación Confemetal Editorial. ISBN 9788416671199.

Saltan, M., Saltan, S., & Şahiner, A. (2007). Fuzzy logic modeling of deflection behavior against dynamic loading in flexible pavements. *Construction and*

Building Materials, 21(7), 1406-1414. ISSN 0950-0618.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.07.004>

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2006). *MODELACIÓN DE DEMANDA PARA CARRETERAS DE CUOTA*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2014). *MANUAL DE SEÑALIZACIÓN VIAL Y DISPOSITIVOS DE SEGURIDAD*. México D.F.: Secretaría de Comunicaciones y Transportes. ISBN 987-607-95879-2-5.

Secretaría de Desarrollo Social . (2005). *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*. México: DIRECCIÓN GENERAL DE ORDENACION DEL TERRITORIO.

Shi, Q., & Abdel-Aty, M. (2015). Big Data applications in real-time traffic operation and safety monitoring and improvement on urban expressways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58(B), 380-394, ISSN 0968-090X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.02.022>

Sifakis, J. (2011). A vision for computer science – the system perspective. *Central European Journal of Computer Science*, 1:1, 108-116.

Sugiyama, Y., Fukui, M., Kikuchi, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Nishinari, K., . . . Yukawa, S. (2008). Traffic jams without bottlenecks—experimental. *New Journal of Physics*, 10, 1-7. doi:10.1088/1367-2630/10/3/033001

Sun, Z., & Ban, X. (2018). Vehicle classification from low-frequency GPS data with recurrent neural networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 91, 176-191. ISSN 0968-090X. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.03.024>

Taha, M., & Ibrahim, L. (2012). Traffic Simulation System based on Fuzzy Logic. *Procedia Computer Science*, 12, 356-360. ISSN 1877-0509. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procs.2012.09.084>

- Taylor, M. A. (1992). Exploring the Nature of Urban traffic. *Proceedings of the Australian Road Research Board* , 16(5), 83-105.
- Thomas, B., Holland, J. D., & Minot, E. O. (2011). Wildlife tracking technology options and cost considerations. *Wildlife Research*, 38:8, 653-663.
- Torres-Vargas , G., & Pérez-Sánchez, J. (2002). *MÉTODOS DE ASIGNACIÓN DE TRÁNSITO EN REDES REGIONALES DE CARRETERAS: DOS ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte.
- Torres-Vargas, G., & Hernández-García, S. (2006). *Propuesta metodológica para la estimación del valor del tiempo de los usuarios de la infraestructura carretera en México: el caso del transporte de pasajeros*. Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano del Transporte. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt291.pdf>
- Vega-González, L. (2005). Hacia la convergencia total de las tecnologías de la información. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 6:2, 103-118, ISSN 2594-0732.
- Wang, Z. (2012). A Comparison of Floating Car vs. Loop Detector Estimated Freeway Travel Time Delay. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 1(2), 147-169, ISSN 2046-0430. doi:<https://doi.org/10.1260/2046-0430.1.2.147>
- Webster, F. (1958). TRAFFIC SIGNAL SETTINGS. *Road Research Lab Tech Papers*, 39.
- Wen, K., Yang, W., & Qu, S. (2010). A stochastic adaptive traffic signal control model based on fuzzy reinforcement learning. *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, (págs. 467-471). doi:10.1109/ICCAE.2010.5451248

- Xirogiannis, G., Stefanou, J., & Glykas, M. (2004). A fuzzy cognitive map approach to support urban design. *Expert Systems with Applications*, 26(2), 257-268. ISSN 0957-4174. doi:[https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(03\)00140-4](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(03)00140-4)
- Ye, B., Wu, W., Zhou, X., Mao, W., & Huang, Y. (2014). A green wave band based method for urban arterial signal control. *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control* (págs. 126-131). Miami, FL: IEEE. doi:10.1109/ICNSC.2014.6819612
- Yong-chuan, Z., Xiao-qing, Z., li-ting, Z., & Zhen-ting, C. (2011). Traffic Congestion Detection Based On GPS Floating-Car Data. *Procedia Engineering*, 15, 5541-5546. ISSN 1877-7058. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1028>
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. ISSN 0019-9958. doi:[https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhang, Y., Zuo, X., Zhang, I., & Chen, Z. (2011). Traffic Congestion Detection Based On GPS Floating-Car Data. *Procedia Engineering*, 15, 5541-5546, 1877-7058. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.1028>
- Zheng, S., & Xu, J. (2011). Research on red wave and green wave coordinated control model in arterial road for different traffic demands. *2011 International Conference on Multimedia Technology* (págs. 1661-1664). Hangzhou, China: IEEE. doi:10.1109/ICMT.2011.6003197

6. ANEXOS

6-1. Carta de consentimiento informado.

CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Lugar: Santiago de Querétaro, Qro.

Investigador: Ing. Sergio Luis Montiel Rodríguez

Documento de Consentimiento Informado para: Universidad Autónoma de Querétaro

Introducción:

Yo, Sergio Luis Montiel Rodríguez estudio la Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad en la Universidad Autónoma de Querétaro, estamos realizando un estudio de movilidad para lograr optimizar los tiempos de los semáforos en las intersecciones, la investigación se relaciona con la conducción de un vehículo en un circuito que fue seleccionado por ser una zona en la cual se presenta mucho tráfico.

Esta investigación requiere de su apoyo como conductor de un vehículo, en el cual se realizarán varios recorridos sobre la zona que se pretende analizar. De esta forma, se le invita a participar en dicho estudio, siempre y cuando cuente con su licencia de conducir vigente. Su participación en esta investigación será totalmente voluntaria, usted puede participar o no, cambiar de idea más tarde o dejar de participar en cualquier momento.

El vehículo que conducirá, estará instrumentado con dispositivos GPS que captarán los datos del recorrido, de esta forma los datos nos proporcionarán la información necesaria para conocer cuándo la vialidad se encuentre saturada de vehículos en función de las velocidades a las que el automóvil se está trasladando a lo largo del circuito.

Después de conocer dichas velocidades, se procesa la información para generar un modelo de estimación de la cantidad de vehículos que se encuentran en la vialidad en ese momento, se realizará una simulación con un programa computacional y se busca la optimización del sistema de semáforos.

Esta investigación durará hasta julio del 2020, durante este periodo será necesario recopilar datos con los vehículos instrumentados en los horarios que sean acordados por el investigador.

Método del vehículo flotante:

Para estos estudios es necesario un vehículo que efectúe varias veces el recorrido que se analiza, que conviene que tenga unas características medias representativas del parque vehicular de la zona donde se va realizar el estudio y que esté en condiciones de uso óptimas.

Además del cuenta kilómetros normal, el automóvil debe ir provisto en este caso, de un arduino (tarjeta de procesamiento de datos), el cual opera como un sistema de posicionamiento global, que será el instrumento que obtendrá las variables a analizar.

El proceso de medida se inicia partiendo del punto de comienzo del itinerario, iniciando en cero el equipo de medición, este generará los datos correspondientes hasta completar el circuito o final del recorrido.

Cuando además del tramo total se quieren hacer lecturas parciales, se harán en los puntos que los separen y que sean fácilmente identificables. Una condición fundamental para la validez del estudio es que las condiciones de circulación a lo largo de todo el recorrido sean realmente representativas de la mayoría de los vehículos, es decir, fluir en el tráfico a la velocidad a la que los otros usuarios están operando, se rebasa a tantos vehículos como rebasen al participante. Si el tráfico es intenso, el conductor deberá ir lo más rápido posible, pero siempre con la cautela y precaución requeridas.

Buenas prácticas de la conducción, medidas de seguridad y salud que deben ser de conocimiento de los participantes:

En cuanto a las buenas prácticas de conducción de vehículos y circulación por vialidades en la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro. nos basaremos en el Reglamento de la Ley de Tránsito para el Estado de Querétaro, presentado por la Secretaría de gobierno de Querétaro (2018). En su artículo 47 establece que para los conductores (participantes) se tendrán las siguientes obligaciones:

Portar licencia para conducir vigente, seguir las instrucciones del personal operativo, respetar la señalización vial establecida, salvaguardar la integridad física y de peatones, hacer uso de los carriles de circulación de manera responsable, circular en el sentido que indique la vialidad, rebasar otro vehículo sólo por el lado izquierdo, conservar respecto al vehículo que le preceda una distancia razonable que garantice la detención oportuna en caso de que éste frene intempestivamente, indicar oportunamente la dirección de su giro o cambio de carril mediante luces direccionales, ceder el paso a los vehículos de emergencia que circulen con las señales luminosas y audibles encendidas, disminuir la velocidad y extremar precauciones en zonas escolares y en zonas con vías férreas.

También mencionaremos las medidas de seguridad que se deben realizar al momento de conducir el vehículo, basándonos en el reglamento previamente mencionado. El artículo 80 nos indica que, los conductores de vehículos motorizados deberán:

Sujetar firmemente con ambas manos el volante de dirección y no permitir bajo ninguna circunstancia que otro pasajero lo tome parcial o totalmente, el conductor y todos los pasajeros deben colocarse correctamente el cinturón de seguridad, encender las luces cuando disminuya sensiblemente la visibilidad por cualquier factor ambiental o por las características de la infraestructura vial y encender las luces preventivas por caso fortuito o de fuerza mayor cuando se detenga el vehículo.

En el mismo Reglamento de la Ley de Tránsito para el Estado de Querétaro, a cargo de la Secretaría de Gobierno de Querétaro (2018), se dice que para cumplir con las obligaciones ambientales, se presenta el artículo 119 el cual aplica para los propietarios de los vehículos que circulen por vías públicas del estado:

Someter los vehículos a la verificación de emisión de contaminantes en los centros de verificación, realizar las reparaciones necesarias a su vehículo, en caso de que no aprueben la verificación vehicular, evitar emisiones excesivas de humo y gases tóxicos de los vehículos y evitar el ruido excesivo del claxon y el silenciador.

Los riesgos:

Al momento de conducir un vehículo, existe el riesgo de sufrir algún daño. A lo que a externos se refiere, se contará con el seguro del vehículo el cual debe cubrir daño a terceros. En el caso de los participantes, se les hace saber que al momento de realizar el estudio existe un riesgo de accidentalidad que se presenta al conducir un automóvil y que en conocimiento de lo mencionado, aceptan participar en la investigación, en la cual el investigador y la Universidad Autónoma de Querétaro no se hacen responsables por cualquier tipo de daño, ya sea físico o psicológico al momento de realizar cualquiera de las actividades relacionadas con esta investigación.

Confidencialidad:

Nosotros no compartimos la identidad de aquellos que participen en la investigación, la información acerca de usted que se recogerá durante la investigación será puesta fuera de alcance y nadie sino los investigadores tendrán acceso a ella. No se emplearan datos personales, sólo se comprobará que el participante cumpla con los requisitos establecidos como son el permiso de conducir vigente, seguro que contemple daño a terceros y la verificación del automóvil que se va a emplear.

Resultados:

El conocimiento que obtengamos por realizar esta investigación se compartirá con usted antes de que se haga disponible al público. No se compartirá información confidencial.

Contacto:

En caso de que exista alguna duda respecto a lo que aquí está estipulado, puede realizar preguntas ahora, más tarde o inclusive después de haber iniciado el estudio.

Consultar con:

Ing. Sergio Luis Montiel Rodríguez

Tel: 462 107 90 47

Correo: Sergio_mcr93@hotmail.com

He leído la información proporcionada o me ha sido leída. He tenido la oportunidad de preguntar sobre ella y se me ha contestado satisfactoriamente las preguntas que he realizado. Consiento voluntariamente participar en esta investigación como participante y entiendo que tengo el derecho de retirarme de la investigación en cualquier momento sin verme afectado de ninguna manera.

Nombre del Participante _____

Firma del Participante _____

Fecha _____ **Día/mes/año**

6-2. Solicitud de información a la Secretaría de Movilidad de Querétaro.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO



Santiago de Querétaro, Querétaro.
Fecha: 25 de Septiembre de 2019

3956

M. I. Cecilia Vázquez Sánchez
Jefa del Departamento de Semaforización
Secretaría de Movilidad del Municipio de Querétaro

Asunto: Solicitud de Información de aforos vehiculares del corredor Zaragoza.

Estimada Maestra Cecilia Vázquez Sánchez.

Por medio de la presente, me permito solicitar información la cual será empleada en el proyecto de investigación titulado "Optimización de un sistema de semáforos mediante simulación empleando un vehículo flotante", proyecto que derivará en la tesis que actualmente trabajo para obtener el grado de Maestría en Vías Terrestres y Movilidad, otorgado por la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

El propósito de la investigación es obtener tiempos de recorrido y demora en la Avenida Zaragoza entre la calle La Aurora y Avenida 5 de Febrero, para posteriormente generar un modelo de estimación del tránsito y realizar una mejora en el sistema de semáforos, razón por la cual solicito información de aforos vehiculares del corredor Zaragoza.

El campo de investigación puede derivar en el hecho de generar una metodología que reduzca los tiempos de estudio y el costo de los mismos, creando una oportunidad potencial para el campo de acción de futuros proyectos de la Ingeniería de tránsito.

En espera de una respuesta favorable, me permito agradecer de antemano su colaboración y atención prestada, quedo a sus órdenes para aclarar cualquier duda sobre la finalidad y alcances de la investigación a mi cargo.


Ing. Sergio Luis Montiel Rodríguez
Alumno de la Maestría en Ingeniería
de Vías Terrestres y Movilidad
Correo: sergio_mcr93@hotmail.com
Teléfono: 4621079047


Dra. María de la Luz Pérez Bea
Coordinadora de la Maestría en Ingeniería
de Vías Terrestres y Movilidad
Correo: perea@uaq.mx

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
CERRO DE LAS CAMPANAS S/N, COL. LAS CAMPANAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
C.P. 76010 QUERÉTARO, QRO. TEL. 192 12 00 EXT. 6023

ZARAGOZA/IGNACIO PEREZ MAÑANA

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	15	0	0	0	15
00:15	00:30	0	14	0	0	0	14
00:30	00:45	0	15	0	0	0	15
00:45	01:00	0	11	0	0	0	11
TOTALES 0 35 0 0 0 0 51							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	1	245	49	0	0	295
00:15	00:30	1	276	42	3	0	321
00:30	00:45	3	258	50	1	0	311
00:45	01:00	3	205	81	0	0	289
TOTALES 6 1038 211 4 1258							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	90	0	1	0	91
00:15	00:30	1	76	0	0	0	77
00:30	00:45	4	133	0	2	0	141
00:45	01:00	1	100	0	0	0	101
TOTALES 6 401 0 2 3 410							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	204	42	2	0	248
00:15	00:30	5	200	28	0	0	224
00:30	00:45	14	209	43	0	0	266
00:45	01:00	0	208	42	0	0	250
TOTALES 21 907 145 2 1145							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	49	3	1	0	53
00:15	00:30	1	43	0	0	0	44
00:30	00:45	1	43	1	0	0	45
00:45	01:00	0	40	0	0	0	40
TOTALES 2 175 4 1 182							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	35	1	0	0	36
00:15	00:30	1	37	0	0	0	38
00:30	00:45	3	11	1	1	0	16
00:45	01:00	0	40	3	0	0	43
TOTALES 4 123 5 2 130							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	13	0	0	0	13
00:15	00:30	0	14	0	0	0	14
00:30	00:45	0	18	0	0	0	18
00:45	01:00	0	15	0	1	0	16
TOTALES 0 50 0 1 51							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	IGNACIO PERI mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	30	0	0	0	30
00:15	00:30	0	39	0	0	0	39
00:30	00:45	0	11	0	0	0	11
00:45	01:00	0	11	0	1	0	12
TOTALES 0 100 0 1 101							

ZARAGOZA/NICOLAS CAMPA MAÑANA

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	1	0	0	0	1
00:15	00:30	0	3	0	0	0	3
00:30	00:45	0	2	0	0	0	2
00:45	01:00	0	2	0	0	0	2
TOTALES 0 6 0 0 0 6							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	0	0	0	0	0
00:15	00:30	0	12	0	0	0	12
00:30	00:45	0	19	0	0	0	19
00:45	01:00	0	0	0	0	0	0
TOTALES 0 31 0 0 0 31							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	1	26	0	0	0	27
00:15	00:30	0	31	0	0	0	31
00:30	00:45	0	37	0	0	0	37
00:45	01:00	1	27	0	0	0	28
TOTALES 2 121 0 0 0 123							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	29	0	0	0	29
00:15	00:30	0	38	0	0	0	38
00:30	00:45	0	48	0	0	0	48
00:45	01:00	0	37	0	0	0	37
TOTALES 0 152 0 0 0 152							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	1	0	1	0	0	2
00:15	00:30	0	3	1	0	0	4
00:30	00:45	1	0	1	0	0	2
00:45	01:00	0	2	0	0	0	2
TOTALES 2 6 2 1 5							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	201	42	1	0	244
00:15	00:30	0	245	39	1	0	285
00:30	00:45	0	33	0	0	0	33
00:45	01:00	3	205	45	1	0	254
TOTALES 3 684 126 3 813							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	21	0	0	0	21
00:15	00:30	0	30	0	0	0	30
00:30	00:45	0	33	0	0	0	33
00:45	01:00	0	16	0	0	0	16
TOTALES 0 80 0 0 0 80							

fecha	08-may hora				07-30 lugar	NICOLAS CAM mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	7	262	48	0	0	317
00:15	00:30	11	262	51	0	0	324
00:30	00:45	3	262	48	0	0	313
00:45	01:00	11	262	42	0	0	315
TOTALES 21 1048 189 0 1237							

ZARAGOZA/IZQUIERDA MONTES MAÑANA

fecha	23-may hora				07-30 lugar	IZQUIERDA MC mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	2	329	51	0	0	382
00:15	00:30	4	371	47	1	0	423
00:30	00:45	3	359	52	1	0	415
00:45	01:00	3	343	41	1	0	388
TOTALES 12 1402 98 3 1503							

fecha	23-may hora				07-30 lugar	IZQUIERDA MC mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	1	203	0	0	0	204
00:15	00:30	4	286	1	0	0	291
00:30	00:45	7	230	1	0	0	238
00:45	01:00	0	227	0	0	0	227
TOTALES 12 946 1 0 0 947							

fecha	23-may hora				07-30 lugar	IZQUIERDA MC mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	3	223	23	2	0	251
00:15	00:30	5	210	27	0	0	242
00:30	00:45	4	213	21	3	0	241
00:45	01:00	2	218	23	0	0	241
TOTALES 14 864 73 5 942							

fecha	23-may hora				07-30 lugar	IZQUIERDA MC mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	1	66	14	1	0	82
00:15	00:30	0	68	11	1	0	80
00:30	00:45	0	65	13	1	0	79
00:45	01:00	1	62	12	1	0	76
TOTALES 2 201 48 4 253							

fecha	23-may hora				07-30 lugar	IZQUIERDA MC mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	42	2	0	0	44
00:15	00:30	0	47	1	0	0	48
00:30	00:45	0	40	1	0	0	41
00:45	01:00	0	40	2	0	0	42
TOTALES 0 174 4 0 0 178							

fecha	23-may hora				07-30 lugar	IZQUIERDA MC mos	
	a	M	A	B	DE-30	Pesados	TOTALES
00:00	00:15	0	74	0	1	0	75
00:15	00:30	1	88	0	0	0	89
00:30	00:45	0	79	0	0	0	79
00:45	01:00	2	82	7	1	0	92
TOTALES 3 323 7 2 332							

ZARAGOZA/MELCHOR OCAMPO MAÑANA

fecha	23-may hora			07:30 lugar			MELCHOR OC	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	2	17	1	1	21		
00:15	00:30	0	22	4	0	26		
00:30	00:45	3	18	1	1	23		
00:45	01:00	2	23	2	0	27		
TOTALES		7	80	20	2	102		

fecha	23-may hora			07:30 lugar			MELCHOR OC	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	0	30	0	0	30		
00:15	00:30	2	25	0	0	27		
00:30	00:45	0	15	0	0	15		
00:45	01:00	1	43	0	0	44		
TOTALES		3	103	0	0	106		

ZARAGOZA/VICENTE SURRINO MAÑANA

fecha	24-sep hora			07:30 lugar			VICENTE OUE	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	8	202	46	3	259		
00:15	00:30	8	251	52	0	309		
00:30	00:45	2	246	51	4	303		
00:45	01:00	8	237	47	2	294		
TOTALES		26	936	206	9	1164		

fecha	24-sep hora			07:30 lugar			VICENTE OUE	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	0	34	0	0	34		
00:15	00:30	1	43	0	2	46		
00:30	00:45	0	31	0	0	31		
00:45	01:00	0	27	0	1	28		
TOTALES		1	135	0	3	139		

ZARAGOZA/JONACKO ALLENDE MAÑANA

fecha	23-sep hora			07:30 lugar			JONACKO ALLE	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	8	231	50	3	310		
00:15	00:30	2	262	58	0	303		
00:30	00:45	0	241	55	0	296		
00:45	01:00	0	270	48	1	309		
TOTALES		10	1004	211	4	1219		

fecha	23-sep hora			07:30 lugar			JONACKO ALLE	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	3	54	0	2	59		
00:15	00:30	0	30	0	0	30		
00:30	00:45	3	61	0	2	66		
00:45	01:00	1	48	0	0	49		
TOTALES		7	193	0	4	204		

ZARAGOZA/JUÁREZ MAÑANA

fecha	25-sep hora			07:30 lugar			ZARAGOZA/JU	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	2	234	41	0	277		
00:15	00:30	0	342	43	2	387		
00:30	00:45	0	263	46	0	309		
00:45	01:00	0	276	33	0	295		
TOTALES		2	915	123	2	1141		

fecha	25-sep hora			07:30 lugar			ZARAGOZA/JU	mes
	a	M	A	B	C	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	12	237	30	5	284		
00:15	00:30	3	279	27	0	309		
00:30	00:45	3	266	24	3	300		
00:45	01:00	2	233	29	0	260		
TOTALES		20	1015	110	8	1133		

CORRESDOR SUR MARABANA												
No	Fecha			06-may hora			07-30 lugar		CORRESDOR mos			TOTAL
	a	M	A	A	B		08:30	08:30	Peasabn	TOTAL		
	00:00	00:15	0	71	4	0	0	0	75			
	00:15	00:30	0	107	5	0	0	0	112			
	00:30	00:45	0	36	7	0	0	0	43			
	00:45	01:00	0	50	9	0	0	0	59			
	TOTAL			0	264	25	0	0	314			

ALAMEDA MARABANA												
No	Fecha			01-oct hora			07-30 lugar		ALAMEDA mos			TOTAL
	a	M	A	A	B		08:30	08:30	Peasabn	TOTAL		
	00:00	00:15	0	239	48	0	0	0	288			
	00:15	00:30	3	262	41	0	0	0	306			
	00:30	00:45	0	313	48	0	0	0	361			
	00:45	01:00	4	270	44	0	0	0	318			
	TOTAL			7	1114	182	0	0	1303			

CORRESDOR SUR MARABANA												
No	Fecha			06-may hora			07-30 lugar		CORRESDOR mos			TOTAL
	a	M	A	A	B		08:30	08:30	Peasabn	TOTAL		
	00:00	00:15	0	20	1	0	0	0	21			
	00:15	00:30	0	71	0	0	0	0	71			
	00:30	00:45	0	37	0	0	0	0	37			
	00:45	01:00	0	64	0	0	0	0	64			
	TOTAL			0	172	0	0	0	252			

CORRESDOR SUR MARABANA												
No	Fecha			06-may hora			07-30 lugar		CORRESDOR mos			TOTAL
	a	M	A	A	B		08:30	08:30	Peasabn	TOTAL		
	00:00	00:15	0	300	0	0	0	0	300			
	00:15	00:30	0	271	0	0	0	0	271			
	00:30	00:45	0	234	0	0	0	0	234			
	00:45	01:00	0	241	0	0	0	0	241			
	TOTAL			0	1046	0	0	0	1042			

ALAMEDA MARABANA												
No	Fecha			01-oct hora			07-30 lugar		ALAMEDA mos			TOTAL
	a	M	A	A	B		08:30	08:30	Peasabn	TOTAL		
	00:00	00:15	0	225	40	0	0	0	265			
	00:15	00:30	0	258	37	0	0	0	295			
	00:30	00:45	0	223	33	0	0	0	256			
	00:45	01:00	0	160	34	0	0	0	194			
	TOTAL			0	866	144	0	0	1012			

CORRESDOR SUR MARABANA												
No	Fecha			06-may hora			07-30 lugar		CORRESDOR mos			TOTAL
	a	M	A	A	B		08:30	08:30	Peasabn	TOTAL		
	00:00	00:15	0	90	0	0	0	0	90			
	00:15	00:30	0	71	0	0	0	0	71			
	00:30	00:45	0	37	0	0	0	0	37			
	00:45	01:00	0	64	0	0	0	0	64			
	TOTAL			0	262	0	0	0	262			

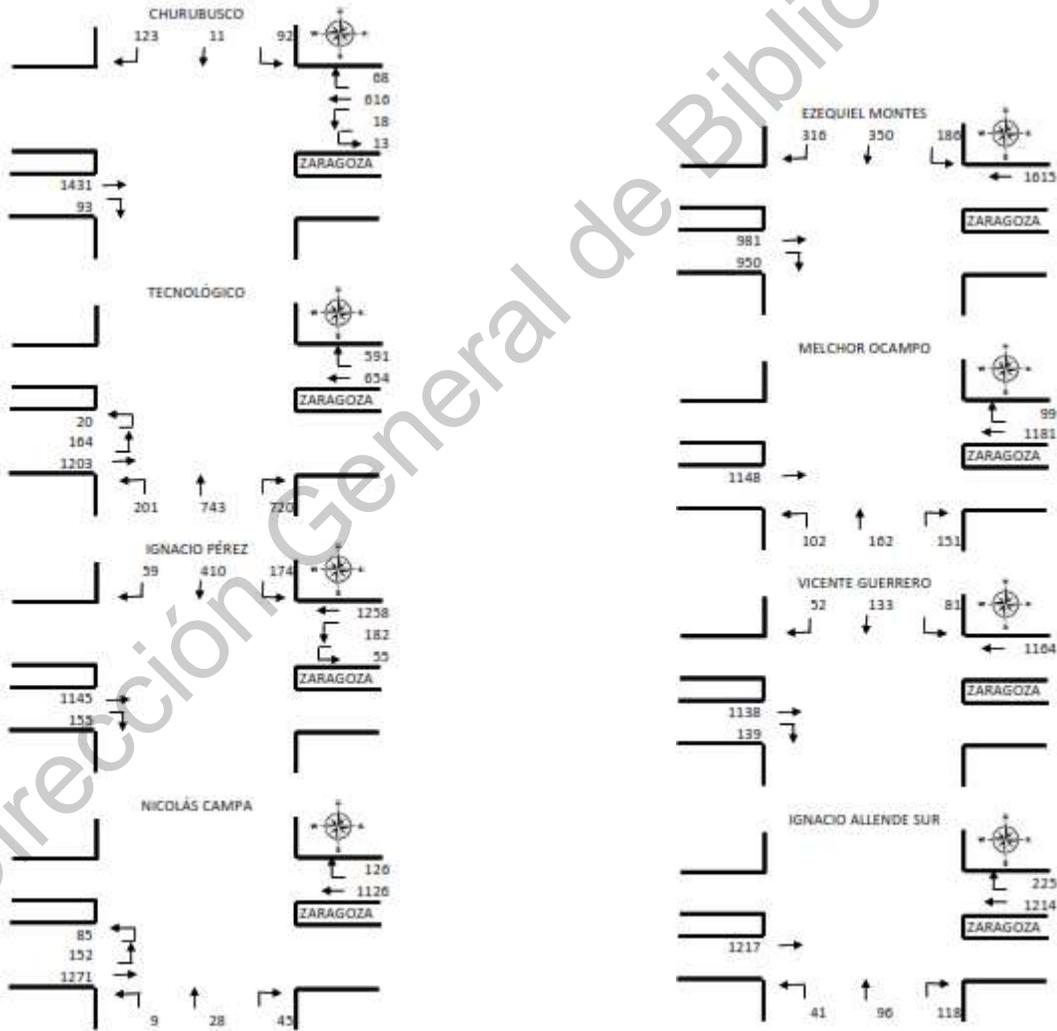
ZARAGOZA/MARQUEL ACUÑA MARINA															
Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov	Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov
de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES		de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	7		210	32	8	264	00:00	00:15	2		263	27	6	396
00:15	00:30	3		204	33	2	242	00:15	00:30	0		273	38	0	308
00:30	00:45	2		254	28	0	282	00:30	00:45	4		332	30	2	368
00:45	01:00	4		239	11	0	274	00:45	01:00	1		252	33	0	286
TOTALES		0	180	0	111	8	1043	TOTALES		7	1100	128	6	1236	

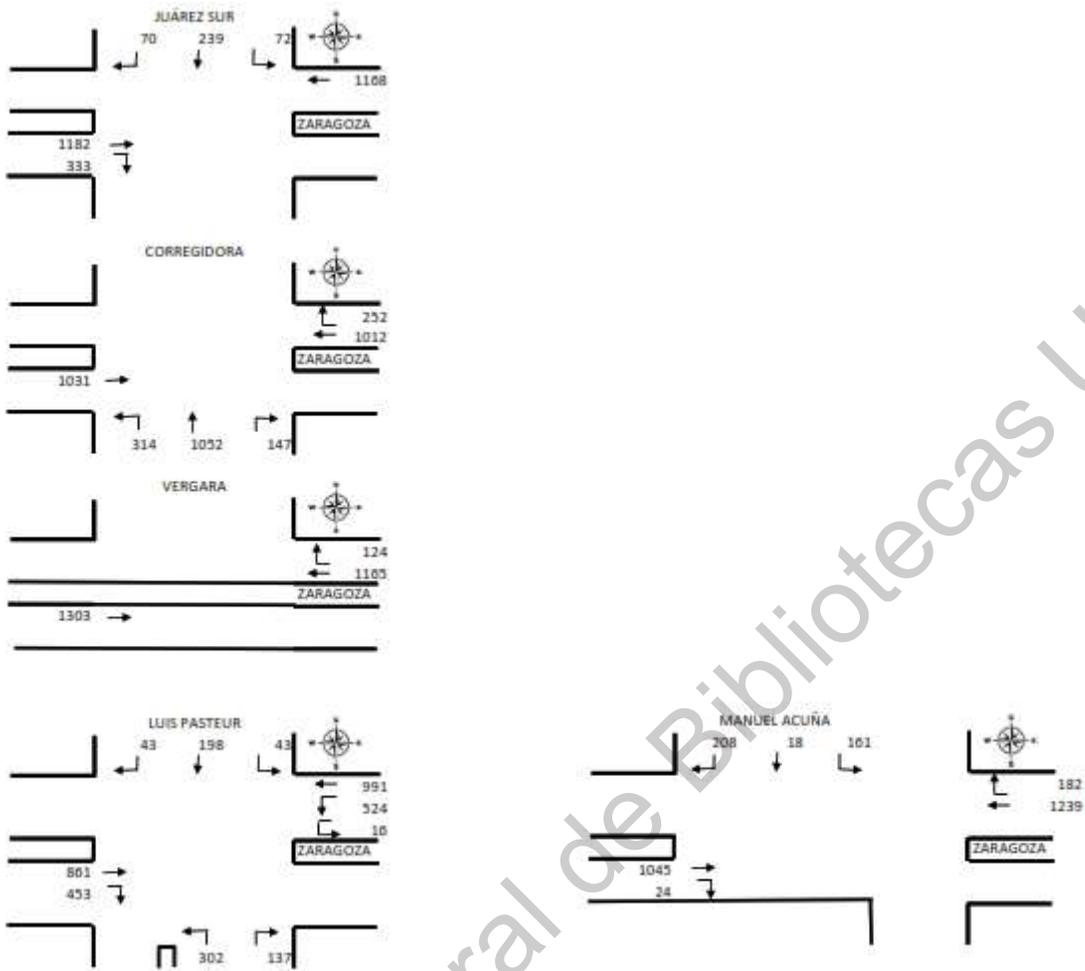
ZARAGOZA/MARQUEL ACUÑA MARINA															
Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov	Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov
de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES		de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	0		41	0	1	43	00:00	00:15	1		45	3	1	50
00:15	00:30	0		32	0	0	32	00:15	00:30	0		51	0	0	51
00:30	00:45	0		48	0	0	48	00:30	00:45	0		53	2	0	55
00:45	01:00	0		38	0	0	38	00:45	01:00	0		48	1	2	52
TOTALES		0	180	0	111	1	162	TOTALES		1	197	3	5	208	

ZARAGOZA/MARQUEL ACUÑA MARINA															
Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov	Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov
de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES		de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	1		32	0	0	33	00:00	00:15	0		2	0	0	2
00:15	00:30	0		43	0	3	46	00:15	00:30	0		5	0	0	5
00:30	00:45	2		41	0	0	43	00:30	00:45	0		4	0	0	4
00:45	01:00	0		39	0	0	39	00:45	01:00	0		7	0	0	7
TOTALES		3	155	0	114	3	161	TOTALES		0	18	0	0	0	18

ZARAGOZA/MARQUEL ACUÑA MARINA															
Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov	Fecha	02-oct hora			07:30 lugar		M ACUÑA	mov
de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES		de	a	M	A	B	Pesados	TOTALES	
00:00	00:15	0		4	0	0	4	00:00	00:15	0		0	0	0	0
00:15	00:30	1		2	0	0	3	00:15	00:30	0		0	0	0	0
00:30	00:45	0		8	0	0	8	00:30	00:45	0		0	0	0	0
00:45	01:00	0		11	0	0	11	00:45	01:00	0		0	0	0	0
TOTALES		1	23	0	25	0	24	TOTALES		0	0	0	0	0	0

6-4. Movimientos direccionales.





6-5. Código desarrollado para el dispositivo colector de datos GPS.

```

/* Colector GPS_SD_LCD
* Conexión de los pines
  Arduino      GPS
  D10          RX
  D11          TX
  3.3V        VCC
  GND         GND

  Arduino      microSD
  D53          CS
  D52          SCK
  D51          MOSI
  D50          MISO
  VCC          5V
  GND         GND

  ARDUINO     LCD I2C
  GND         GND
  5V          VCC

```

```

        D20          SDA
        D21          SCL
*/
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <TinyGPS.h> //incluimos la librería TinyGPS
#include <SoftwareSerial.h> //incluimos la librería SoftwareSerial
#include <SPI.h> //incluimos la librería SPI
#include <SD.h> //incluimos la librería SD
#define SSpin 53 // declaramos el pin 53
File archivo; // declaramos un archivo
TinyGPS gps; //declaramos el objeto GPS
SoftwareSerial serialgps(11,10); //declaramos el pin 4 (Tx del GPS) y
3 (Rx del GPS)
LiquidCrystal_I2C lcd (0x27,16,2);
int year;
byte month, day, hour, minute, second, hundredths;
unsigned long chars;
unsigned short sentences, failed_checksum;
void setup()
{
    Serial.begin(115200); //Iniciamos el puerto serie
    //Imprimimos en el monitor serial:
    Serial.println("Iniciando tarjeta SD...");
    if(!SD.begin(SSpin)){
        Serial.println("falló en inicialización");
        return;
    }
    Serial.println("inicialización correcta");
    //Imprimimos en el monitor serial:
    Serial.println("");
    Serial.println("GPS NEO-6M");
    Serial.println(" ---Buscando señal--- ");
    Serial.println("");
    Serial.println("Latitud      Longitud   Vel      Dist      Fecha      Hora
Altitud      Sats      ");
    Serial.println("(deg)      (deg)      (Km/h) (mps)
(m)      ");
    Serial.println("-----");
    Serial.println("-----");

    //Imprimimos en la tarjeta SD:
    archivo = SD.open("prueba.txt", FILE_WRITE);
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("PROGRAMA ARDUINO"); // Mensaje a despegar
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("COLECTOR GPS"); // Mensaje a despegar
    delay (3000);
    lcd.clear();
    if(archivo) {

```

```

archivo.println("");
archivo.println("GPS NEO-6M");
archivo.println(" ---Buscando señal--- ");
archivo.println("");
archivo.println("Latitud      Longitud   Vel      Dist      Fecha      Hora
Altitud      Sats      ");
archivo.println(" (deg)          (deg)      (Km/h)  (mps)
(m)          ");
archivo.println("-----mega-----
-----");
archivo.close();
} else {
Serial.println("error en apertura de prueba.txt");
}
serialgps.begin(9600); //Iniciamos el puerto serie del gps
}
void loop() {
while(serialgps.available()) //lectura de datos del GPS
{
int c = serialgps.read(); //se declara la variable c para leer los
datos del GPS
if(gps.encode(c)) // datos detectados del GPS para trabajarlos
{
float latitude, longitude, altitude; //declaramos flotante (decimal)
gps.f_get_position(&latitude, &longitude);
Serial.print(latitude,8);
Serial.print(" ");
Serial.print(longitude,8);
Serial.print(" ");
Serial.print(gps.f_speed_kmph());
Serial.print(" ");
Serial.print(gps.f_speed_mps());

gps.crack_datetime(&year,&month,&day,&hour,&minute,&second,&hundredths);
Serial.print(" ");
Serial.print(day, DEC); Serial.print("/"); Serial.print(month, DEC);
Serial.print("/"); Serial.print(year);
Serial.print(" ");
Serial.print(hour-5, DEC); Serial.print(":"); Serial.print(minute,
DEC); Serial.print(":"); Serial.print(second, DEC);
Serial.print(" ");
Serial.print(gps.f_altitude());
Serial.print(" ");
Serial.print(gps.satellites());
Serial.println();
gps.stats(&chars, &sentences, &failed_checksum);

// impresión de datos en la tarjeta microSD
archivo = SD.open("prueba.txt", FILE_WRITE);

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(latitude,4);
lcd.setCursor(7,0);

```

```

lcd.print(longitude,6);
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print("VELOCIDAD:"); // Mensaje a despegar
lcd.setCursor(12,1);
lcd.print(gps.f_speed_kmph());
    if(archivo) {
        archivo.print(latitude,8);
        archivo.print(" ");
        archivo.print(longitude,8);
        archivo.print(" ");
        archivo.print(gps.f_speed_kmph());
        archivo.print(" ");
        archivo.print(gps.f_speed_mps());
        archivo.print(" ");
        archivo.print(day, DEC); archivo.print("/"); archivo.print(month,
DEC); archivo.print("/"); archivo.print(year);
        archivo.print(" ");
        archivo.print(hour-5, DEC); archivo.print(":");
archivo.print(minute, DEC); archivo.print(":"); archivo.print(second,
DEC);

        archivo.print(" ");
        archivo.print(gps.f_altitude());
        archivo.print(" ");
        archivo.print(gps.satellites());
        archivo.println();
        archivo.close();
    }
} else {
    Serial.println("error en apertura de prueba.txt");
}
    delay(500);
}
}
}

```

6-6. Código empleado para la obtención de datos de vehículos flotantes en el simulador AIMSUN.

```

#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include "ANGConProxie.h"
#include "AAPI.h"
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <math.h>
#include <vector>
#include <queue>

int vehic1[20], vehic2[20], vehic3[20], vehic4[20];
int d = 0;
int i,j,k,m;

```

```

int init;
int tiempo;
double speed1[20], speed2[20], speed3[20], speed4[20];
double dist1[20], dist2[20], dist3[20], dist4[20];
double timetracked1[20], timetracked2[20], timetracked3[20],
timetracked4[20];

char astring[128];

int AAPILoad()

{

    return 0;

}

int AAPIIinit()
{

    FILE* logfile3;
    if ((logfile3 = fopen("c:/API/LIGEROS_E_O.csv", "a")) !=
NULL)//CAMBIAR SI ES NECESARIO
    {
        fprintf(logfile3, "ID, ");
        fprintf(logfile3, "Tiempo de Entrada,");
        fprintf(logfile3, "Tiempo de Simulacion,");
        fprintf(logfile3, "Distancia,");
        fprintf(logfile3, "Velocidad \n");

        fclose(logfile3);
    }

    FILE* logfile4;
    if ((logfile4 = fopen("c:/API/LIGEROS_O_E.csv", "a")) !=
NULL)//CAMBIAR SI ES NECESARIO
    {
        fprintf(logfile4, "ID, ");
        fprintf(logfile4, "Tiempo de Entrada,");
        fprintf(logfile4, "Tiempo de Simulacion,");
        fprintf(logfile4, "Distancia,");
        fprintf(logfile4, "Velocidad \n");

        fclose(logfile4);
    }

    return 0;

}

int AAPIManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double
acycle)
{

```

```

tiempo = time;
if (time > 899 && tiempo % 300 == 0)
{
    d = d + 1;
    //OESTE - ESTE
    //vehic2[d] = AKIPTEnterVeh(3062, 2, true);
    vehic4[d] = AKIEnterVehTrafficOD(3088, 1, 460, 498, 1);
    //ESTE - OESTE
    //vehic1[d] = AKIPTEnterVeh(3054, 2, true);
    vehic3[d] = AKIEnterVehTrafficOD(3074, 1, 497, 459, 1);

}

for (k = 1; k <= d; k++)
//
{
    InfVeh infveh3 = AKIVehTrackedGetInf(vehic3[k]);
    dist3[k] = infveh3.TotalDistance;
    timetracked3[k] = infveh3.SystemEntranceT;
    speed3[k] = infveh3.CurrentSpeed;
    sprintf(astring, "ID :%i ", vehic3[k]);
    AKIPrintString(astring);
    sprintf(astring, "Distancia :%f ", dist3[k]);
    AKIPrintString(astring);
    sprintf(astring, "Tiempo de entrada :%f \n",
timetracked3[k]);
    AKIPrintString(astring);
    sprintf(astring, "Velocidad :%f \n", speed3[k]);
    AKIPrintString(astring);
    sprintf(astring, "Tiempo de simulacion :%f \n", time);
    AKIPrintString(astring);

    if (infveh3.report == 0)
    {
        FILE* logfile3;
        if ((logfile3 = fopen("c:/API/LIGEROS_E_O.csv", "a"))
!= NULL) //CAMBIAR SI ES NECESARIO
        {
            fprintf(logfile3, "%i,", vehic3[k]);
            fprintf(logfile3, "%f,", timetracked3[k]);
            fprintf(logfile3, "%f,", time);
            fprintf(logfile3, "%f,", dist3[k]);
            fprintf(logfile3, "%f \n", speed3[k]);

            fclose(logfile3);
        }
    }
}

for (m = 1; m <= d; m++)
//
{
    InfVeh infveh4 = AKIVehTrackedGetInf(vehic4[m]);

```

```

        dist4[m] = infveh4.TotalDistance;
        timetracked4[m] = infveh4.SystemEntranceT;
        speed4[m] = infveh4.CurrentSpeed;
        sprintf(astring, "ID :%i ", vehic4[m]);
        AKIPrintString(astring);
        sprintf(astring, "Distancia :%f ", dist4[m]);
        AKIPrintString(astring);
        sprintf(astring, "Tiempo de entrada :%f \n",
timetracked4[m]);
        AKIPrintString(astring);
        sprintf(astring, "Velocidad :%f \n", speed4[m]);
        AKIPrintString(astring);
        sprintf(astring, "Tiempo de simulacion :%f \n", time);
        AKIPrintString(astring);

        if (infveh4.report == 0)
        {
            FILE* logfile4;
            if ((logfile4 = fopen("c:/API/LIGEROS_O_E.csv", "a"))
!= NULL)//CAMBIAR SI ES NECESARIO
            {
                fprintf(logfile4, "%i", vehic4[m]);
                fprintf(logfile4, "%f", timetracked4[m]);
                fprintf(logfile4, "%f", time);
                fprintf(logfile4, "%f", dist4[m]);
                fprintf(logfile4, "%f \n", speed4[m]);

                fclose(logfile4);
            }
        }
        return 0;
}

int AAPIPostManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double
acycle)
{
    return 0;
}
int AAPIFinish()
{
    AKIPrintString("\tFinish");
    return 0;
}
int AAPIUnload()
{
    return 0;
}

```