

Ing. Pedro Apolinar Molina
González

Implementación en AIMSUN de modelo de
comportamiento vehicular en intersecciones
semaforizadas.

2018



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería.

Implementación en AIMSUN de modelo de comportamiento
vehicular en intersecciones semaforizadas.

Tesis

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

Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Pedro Apolinar Molina González

Dirigido por:

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca

C.U. Querétaro, Qro. Octubre de 2018



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

Implementación en AIMSUN de modelo de comportamiento
vehicular en intersecciones semaforizadas.

TESIS

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

Presenta:

Pedro Apolinar Molina González.

Dirigido por:

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca.

Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca
Presidente

Dr. Omar Chávez Alegría
Secretario

Dr. María de la Luz Pérez Rea
Vocal

M.I. Marco Luis Dorado Pineda
Suplente

M.I. Gerardo Ríos Quezada
Suplente

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad de Ingeniería

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre 2018

RESUMEN

Los simuladores de tráfico crean representaciones digitales útiles para el análisis de la situación actual de la red carretera y la evaluación de propuestas de mejoras ante conflictos. Para realizar modelos representativos del comportamiento vehicular los programas de simulación emplean modelos matemáticos que surgen del análisis de usuarios en situaciones reales. Los modelos actuales que emplean los simuladores son obtenidos con base a datos de operación en ciudades desarrolladas. Cuando estos simuladores son empleados para evaluar situaciones en ciudades en desarrollo, como la ciudad de Querétaro, es necesario realizar mayores esfuerzos para la calibración y validación de los escenarios, debido que las condiciones de operación e infraestructura son diferentes. Del análisis de intersecciones semaforizadas en AIMSUN se observan comportamientos vehiculares que no se corresponden con la realidad (e.g. las velocidades vehiculares que no se modifican cuando los vehículos han tomado la decisión de cruzar la intersección cuando la fase ha terminado). El objetivo de la presente investigación es la estimación de un modelo de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas y realizar una comparación con el comportamiento actual del simulador AIMSUN mediante el empleo de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) para identificar el comportamiento de los vehículos simulados. El modelo obtenido incluye variables de velocidad y tiempo restante de la fase en dos puntos de control (90 y 45 m hasta la línea de parada).

(Palabras clave: AIMSUN, API, Comportamiento vehicular, Intersección semaforizada, Simulación.).

SUMMARY

Traffic simulators create digital representations to analyze the current situation of road networks and to evaluate proposed improvements when faced with conflicts. To simulate these networks, the simulator use mathematical models of driver's behavior obtained from real situations analysis to simulate real behavior. The current models are obtained based on observational data from developed countries. When these simulators are used to represent situations in emerging countries, (e.g. Querétaro City), it is necessary to make a greater effort to calibrate and validate the scenarios, because the infrastructure and operation conditions are different. From the analysis of signalized intersections scenarios in AIMSUN, it can be observed that driver's conducts do not correspond with real behavior (e.g. the speed of the simulated vehicles does not change when they decide to cross intersection at the end of green signal). The aim is estimate model that predict the driver's behavior in signalized intersections and compare it with the actual behavior implemented in AIMSUN simulator by an Application Programming Interface (API). The estimated model considers the approximation speed and the remaining time of the green phase in two control points (situated 45 m and 90 m up to the stop line) as the variables to emulate the driver's behavior in signalized intersections.

(Key words: AIMSUN, API, Vehicle behavior, Signalized intersections, Simulation.).

DEDICATORIA

A mi madre por supuesto, una luchadora incansable, de quien aprendí a entregar lo mejor de mí en todo lo que hago, también que la educación es la único que nadie puede quitarme.

A mi tío Benjamín, quien me quiso como a un hijo y a quien seguiré amando como a un padre, todo esto ha sido por él, para honrar lo mucho que me dio y lo mucho que aprendí de él.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, que ha sido el sustento emocional todo el tiempo que he permanecido lejos de casa, en especial a mi hermano Pablo quien ha estado a mi lado desde siempre.

A mi director de tesis el Dr. Saúl Antonio Obregón Biosca de quien he recibido la mejor guía en este camino, al maestro Marco Luis Dorado Pineda ya que sin sus conocimientos seguiría perdido en el código. A la Dra. María de la Luz Pérez Rea y el Dr. Omar Chávez Alegría, por sus acertados consejos y observaciones, que han mejorado este trabajo. Al maestro Gerardo Ríos Quezada, que además de sus consejos me ha contagiado su pasión por esta maestría. A todos los docentes que con su luz me han ampliado el horizonte académico en los últimos dos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), que me permitió el sustento económico, sin el cual este proyecto no hubiese sido posible.

A nuestra *Alma Mater*, la Universidad Autónoma de Querétaro.

TABLA DE CONTENIDOS

Pág.

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
TABLA DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	XI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 <i>Descripción del problema</i>	4
1.2 <i>Justificación</i>	5
1.3 <i>Hipótesis</i>	6
1.4 <i>Objetivo</i>	6
2 MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 <i>Semáforos</i>	7
2.1.1 Requisitos para la colocación de semáforos	8
2.1.2 Tipos de control semafórico	10
2.1.3 Conceptos básicos.....	11
2.1.3.1 Movimientos y fases	12
2.2 <i>Intersecciones semaforizadas</i>	13
2.2.1 Nivel de servicio en una intersección semaforizada.....	14
2.2.2 Accidentabilidad en intersecciones semaforizadas	16
2.2.3 Zonas creadas en una intersección semaforizada	16
2.3 <i>Modelos de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas</i>	19
2.3.1 Driver Task Cube	20
2.3.2 Variables que intervienen en el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas	21
2.3.3 Desarrollo de modelos de simulación.....	24
2.4 <i>Simuladores computacionales de tráfico</i>	26

V

2.4.1	VISSIM	26
2.4.2	Paramics	27
2.4.3	MITSIMLab.....	28
2.4.4	DRACULA	29
2.4.5	DynaMIT.....	29
2.4.6	AIMSUN	30
2.5	<i>Programación de API's</i>	32
2.5.1	Programación en AIMSUN	33
2.5.2	Principios para la creación de modelos en AIMSUN	33
2.5.3	Sistemas de simulación de transporte.....	34
2.5.4	Modelo de seguimiento de Gipps	34
2.5.5	Modelo de cambio de carril	36
3	METODOLOGÍA	38
3.1	<i>Estudio de comportamiento vehicular en simulador</i>	39
3.1.1	Elección de simulador a emplear	39
3.1.2	Creación de intersección de prueba.....	40
3.1.3	Incorporación de características vehiculares.....	41
3.1.4	Características del plan de control	44
3.1.5	Programación de API para obtención de datos.....	45
3.2	<i>Obtención de modelo de comportamiento vehicular</i>	47
3.2.1	Selección de intersección semaforizada	47
3.2.1.1	Intersecciones no saturadas	48
3.2.1.2	Geometría de la vialidad.....	49
3.2.1.3	Condiciones topográficas.....	49
3.2.1.4	Composición vehicular.....	51
3.2.1.5	Presencia peatonal	51
3.2.2	Estudio de intersección	52
3.2.2.1	Definición del periodo de análisis	52
3.2.2.2	Recolección de datos etapa 1.....	52
3.2.2.3	Determinación de variables asociadas a la intersección en la etapa 1	54
3.2.2.4	Modelación de datos Etapa 1	55
3.2.2.5	Recolección de datos etapa 2.....	56
3.3	<i>Implementación de modelo de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas en AIMSUN</i>	57
3.3.1	Intersección de estudio en AIMSUN.....	59
3.3.2	Características vehiculares y datos de demanda	59
4	RESULTADOS	61

4.1	<i>Resultados del estudio de comportamiento vehicular en el simulador AIMSUN</i>	61
4.1.1	Casos de Yellow Light Running y Red Light Running	61
4.1.2	Comportamientos de parada en intersección de prueba	63
4.2	<i>Resultados de la obtención de modelos de comportamiento vehicular</i>	64
4.2.1	Datos de operación en la intersección	65
4.2.1.1	Diagramas de fases y movimientos en intersección	65
4.2.2	Datos de comportamiento de usuarios en intersección de estudio	67
4.2.3	Modelos obtenidos en la Etapa 1	69
4.2.4	Modelos obtenidos en la Etapa 2	73
4.3	<i>Resultados de la implementación del modelo en AIMSUN</i>	76
4.4	<i>Validación de modelo en intersección urbana</i>	77
5	CONCLUSIONES	79
5.1	<i>Líneas de investigación futura</i>	80
	REFERENCIAS	82
	APENDICE	92
1	ABREVIATURAS	93
2	CÓDIGO FUENTE PARA LEER DATOS DE LA INTERSECCIÓN SEMAFORIZADA DE PRUEBA	94
3	CÓDIGO FUENTE PARA LEER DATOS PARA COMPARACIÓN CON MODELO LOGIT ETAPA 2	97
4	TABLAS DE VELOCIDADES OBTENIDAS EN LOS AFOROS ETAPA 1	101
5	GRÁFICAS DE DENSIDAD CONDICIONAL PARA MODELO 7	102
6	GRÁFICAS DE DENSIDAD CONDICIONAL PARA MODELO 8	105
7	GRÁFICAS DE DENSIDAD CONDICIONAL PARA MODELO 9	106
8	GRÁFICAS DE DENSIDAD CONDICIONAL PARA MODELO 10	107
9	GRÁFICAS DE DENSIDAD CONDICIONAL PARA MODELO 11	108
10	GRÁFICAS DE DENSIDAD CONDICIONAL PARA MODELO 13	110
11	GRÁFICAS DE DENSIDAD CONDICIONAL PARA MODELO 14	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
2.1. Ejemplo de plan de intersección y diagrama de fases.	13
2.2. Zonas creadas en una intersección semaforizada.	19
2.3. Modelo “Driver Task Cube” para la interacción de variables de comportamiento vehicular.	21
2.4. Zonas para el cambio de carril del modelo de Gipps.	37
3.1. Diagrama de flujo de la metodología.	39
3.2. Esquema de funcionamiento de un control externo en AIMSUN.	40
3.3. Grafo de intersección semaforizada de prueba.	41
3.4. Intersección semaforizada de prueba implementada en AIMSUN.	41
3.5. Datos característicos de los vehículos que transitan en Querétaro introducidos en AIMSUN.	43
3.6. Datos de demanda de intersección de prueba.	44
3.7. Diagrama de flujo de la interacción entre el AIMSUN y la API.	47
3.8. Ubicación de la intersección de estudio.	48
3.9. Perfil de elevaciones en el área de la intersección semaforizada de estudio.	50
3.10. Perfil de elevación en la intersección semaforizada seleccionada.	51
3.11. Posición de la cámara de video para grabar el comportamiento en la intersección de estudio.	53
3.12. Velocidad medida respecto del ángulo de incidencia.	54
3.13. Posición de las cámaras de video para grabar el comportamiento en la intersección de estudio.	57
3.14. Diagrama de flujo de la interacción de la API con el simulador AIMSUN.	58
3.15. Intersección semaforizada de estudio implementada en AIMSUN.	59
3.16. Datos de demanda de intersección de prueba.	60
4.1. a) Comportamiento de vehículos que presentaron YLR, b) Comportamiento de vehículos que presentaron RLR.	63

4.2. Comportamiento de frenado de vehículos cuando a) Se encuentran a corta distancia cuando el semáforo cambia a rojo, b) Pueden ver la seña roja desde una distancia mayor a 50 m.	64
4.3. Diagrama de fases y plan en la intersección seleccionada.....	66
4.4. Diagrama de ciclo de señal estudiada.....	67
4.5. Aumento de velocidades promedio cuando el intervalo amarillo se activa según el tipo vehicular.	69
4.6. Porcentajes de Yellow Light Running y Red Light Running para cada tipo vehicular.	69
4.7 Gráficas de densidad condicional para Modelo 3.	72
4.8 Gráficas de densidad condicional para modelo de la Ecuación 4.1.	73
4.9. Gráficas de densidad condicional para Modelo 12.	76
4.10. Presencia de peatones cruzando en punto de control 2.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
2.1. Criterio para la colocación de semáforos según el volumen mínimo vehicular. ...	8
2.2: Criterio para la colocación de semáforos según el volumen mínimo de vehículos por interrupción del tránsito continuo.....	9
2.3. Descripción de las características de los Niveles de Servicio para una intersección semaforizada.....	15
2.4. Variables para clasificación de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas.....	23
3.1. Ficha técnica de los modelos de vehículos que transitan con mayor frecuencia en Querétaro.....	42
3.2. Parámetros estadísticos de los vehículos que transitan con mayor frecuencia en el estado de Querétaro.....	43
3.3. Distribución del ciclo semafórico en intersección de prueba.....	45
3.4. Distancias de visibilidad de parada para diferentes velocidades de proyecto....	49
3.6. Variables medidas en la intersección de estudio.....	55
4.1. Velocidades obtenidas en los aforos realizados el 14 de marzo de 2017 según la clasificación vehicular.	68
4.2. Modelos Logit obtenidos en la Etapa 1.....	70
4.3. Modelos Logit obtenidos en la Etapa 2.....	74
4.4. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas.....	77

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Pág.
<i>2.1 Velocidad máxima para vehículo líder</i>	<i>35</i>
<i>2.2 Velocidad máxima vehículo seguidor</i>	<i>35</i>
<i>2.3 Posición del vehículo en el carril</i>	<i>36</i>
<i>4.1 Modelo de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas</i>	<i>72</i>
<i>4.2 Probabilidad para YLR+RLR para modelo de predicción.....</i>	<i>72</i>

1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento acelerado de la tecnología del transporte en los últimos años ha sobrepasado las condiciones para las cuales fueron proyectadas las vialidades. Para Näätänen y Summala (1982), ello ha dado lugar a un decremento de los niveles de servicio, y a un aumento en el número de accidentes viales. Para Silva (2009), los accidentes de tránsito actualmente en México constituyen parte de la vida cotidiana y, a la vez, un problema global que destruye vidas y medios de sustento. En ese mismo sentido, Cervantes-Trejo et al. (2011), consideran que en México las muertes, discapacidades y lesiones por siniestros viales, tradicionalmente llamados Accidentes de Tránsito de Vehículo Motor (ATVM), son un grave problema de salud pública y de desarrollo.

Los accidentes de tráfico se consideran una externalidad negativa del transporte, relacionada con el aumento de los usuarios, así como un deterioro en la operatividad de la red, (e.g. decremento en de los niveles de servicio). Las heridas causadas por accidentes de tráfico son un problema global que va en aumento. En 2010, 1.3 millones de personas murieron debido a accidentes de tráfico, posicionando esta como la octava causa de muerte mundial, por arriba de condiciones médicas como problemas cardiacos o infecciones como la malaria o el VIH/SIDA (Lozano *et al*, 2010). De acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), estas cifras se han mantenido constantes hasta ahora; también mencionan que entre 20 y 50 millones de personas sufren heridas no fatales, muchas de las cuales resultan en algún tipo de discapacidad.

En algunas ciudades, cerca del 5% de los accidentes de tráfico ocurren en intersecciones semaforizadas y un 40% de estos casos están relacionados con heridas graves y fatalidades (Anjana, S. & M.V.L.R, 2015). Las intersecciones son consideradas puntos de conflicto dentro de una red vial debido a la convergencia de flujos vehiculares con características de operación diversas (Ferreira and & Couto,

2013). Investigadores como González-Fernández *et al.* (2008) y Costescu *et al.* (2016), han relacionado los índices de siniestralidad con las intersecciones viales, considerando que las intersecciones semaforizadas tienen un papel importante no sólo en la regulación del tránsito, sino que de su correcto funcionamiento dependen la seguridad y eficacia de la circulación.

Si bien, el comportamiento de los conductores en una intersección semaforizada implica procesos complejos, relacionados con diferentes factores y niveles de procesamiento, tal cual lo explica Summala (1996), se han estudiado las relaciones por separado de los principales factores que influyen para la ocurrencia de siniestros, así como la manera en la que afectan al comportamiento vehicular. A través de investigaciones de campo Elmitiny *et al.* (2010), analizaron el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas; clasificando dichos comportamientos para encontrar la prevalencia de ciertas variables, relacionadas con las velocidades de los vehículos y su posición al momento en que se activa el intervalo amarillo.

Mhirech y Alaoui-Ismaili (2015) estudiaron el efecto que tienen los tiempos semafóricos sobre a la probabilidad de tener accidentes en intersecciones, encontrando una relación entre la densidad vehicular del camino y los tiempos semafóricos con la probabilidad de ocurrencia de accidentes. Por su parte, y a través del empleo de simuladores de tráfico, Palat y Delhomme (2016) han medido la influencia que tienen algunas variables controladas (presión de tiempo e influencia social) sobre el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas. Mediante el estudio de las variables que influyen en el comportamiento vehicular, pueden proponerse modelos que describan dichas interacciones. Zhou *et al.* (2013) se revisó la correlación entre la ocupación de la red y el comportamiento vehicular en intersecciones para la reducción de accidentes. De manera similar, estudios como el de Li, X. y Sun, J. (2016) se enfocan en la evaluación del desempeño de modelos basados en el comportamiento

vehicular en intersecciones, respecto de variables como los peatones o las velocidades.

Tal como señala Barceló, J. (2010), entre otros factores, el incremento en el poder de las tecnologías computacionales ha promovido que la simulación del tráfico, se convierta en una de las herramientas más empleadas para el análisis del tráfico, así como al diseño y evaluación de sistemas actuales. Los simuladores actuales emplean modelos numéricos para realizar representaciones computacionales (May, 1990). Debido a lo anterior, Wu *et al.* (2013) han empleado la simulación, para evaluar el funcionamiento de modelos de prevención de accidentes en intersecciones, mientras que Strömngren *et al.* (2015) han pasado de la modelación hacia la simulación de intersecciones, para poder validar su comportamiento respecto a la realidad y de esta manera proponer mejoras que mitiguen los accidentes viales.

En este documento se realiza un estudio para encontrar las variables que influyen en el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas, incluyéndolas en un modelo para mejorar la validación en las simulaciones realizadas en programas computacionales.

Debido a las facilidades que el simulador AIMSUN versión 7.0 (*Transport Simulation Systems*, 2011) cuenta para la implementación de mejoras a la simulación gráfica mediante el uso de Interfaces de Programación de Usuarios (API's), fue seleccionado para la implementación del modelo y la posterior validación con escenarios reales.

Escenarios ficticios fueron creados para verificar el comportamiento que el simulador AIMSUN tiene sin la implementación de la API, de manera que sea posible identificar la diferencia posterior a la aplicación de los modelos obtenidos de observaciones en campo.

Se espera que el presente trabajo sirva como guía para futuros proyectos enfocados a la prevención de accidentes viales, así como de evaluación de la seguridad en intersecciones en nuestro país.

1.1 Descripción del problema

Las intersecciones se consideran áreas de conflicto debido tanto a la convergencia de flujos vehiculares, con características de operación diversas. Dentro de las intersecciones, en las semaforizadas se representa una concentración de accidentes debido a que el derecho de paso varía con respecto al tiempo. En una intersección semaforizada, se espera que las luces de los semáforos controlen las fases en que se permiten los movimientos para la asignación del derecho de paso; sin embargo, en la realidad los conductores pueden decidir no obedecer las señales, aumentando en ello el riesgo de siniestros.

En ingeniería de tránsito, los simuladores computacionales de comportamiento vehicular son empleados para crear representaciones digitales útiles para el análisis de la situación actual de la red carretera y la evaluación de propuestas de mejoras ante conflictos viales. Para realizar representaciones gráficas de los comportamientos vehiculares los programas de simulación emplean modelos matemáticos que surgen de la observación del comportamiento vehicular en situaciones reales. Al analizar intersecciones semaforizadas con los programas actuales se observa que las velocidades vehiculares no se modifican cuando los vehículos han tomado la decisión de pasar el semáforo cuando la señal cambia de verde a amarillo, mientras que en situaciones reales algunos usuarios aumentan la velocidad al inicio del intervalo amarillo provocando que crucen la intersección en rojo.

Debido a lo anterior, los resultados obtenidos mediante simulaciones que no son compatibles con la realidad no pueden ser empleados para evaluar la calidad y seguridad de las vialidades.

1.2 Justificación

Las intersecciones semaforizadas se encuentran dentro de los elementos más comunes para el control del tráfico, ya que dicho control se presenta de forma preestablecida y de alguna manera automática, lo cual se consideraba relacionado con la seguridad de los usuarios debido a la no intervención de un regulador subjetivo de los tiempos semafóricos (Shesterov y Mikhailov, 2017). Las intersecciones semaforizadas, consideradas como parte de un sistema tienen un papel importante en la eficiencia por lo que las deficiencias en dichas intersecciones conllevan a problemas de seguridad (Villegas *et al.*, 2017).

Mediante la observación de intersecciones semaforizadas, puede notarse que el comportamiento vehicular real se encuentra lejos de obedecer las indicaciones del semáforo, ya que realizan maniobras de Pasar la luz amarilla o *Yellow Light Running* (YLR) y pasar la luz roja o *Red Light Running* (RLR). Los comportamientos de YLR y RLR están relacionados con accidentes graves según datos de Ko *et al.* (2017). Los accidentes fatales en intersecciones semaforizadas para los Estados Unidos fueron del orden de 8,405 para el 2015 (*U.S. Department of Transportation*, 2015). En México, los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) indican que para el mismo año se tuvieron un total de 255,863 accidentes debido a colisión entre vehículos automotores, sin embargo, no es posible precisar cuántos de ellos se localizaron en intersecciones semaforizadas (INEGI, 2016).

Los factores que influyen en el comportamiento vehicular cuando los conductores se acercan a una intersección semaforizada han sido ampliamente estudiados. Algunos de ellos están relacionados con los usuarios como el tiempo de percepción-reacción, el género, la edad, la agresividad de los conductores (Caird *et al.*, 2007). Otros factores se relacionan con los tipos de vehículo y la geometría de la intersección como la clasificación vehicular, las pendientes, el pavimento y el tipo de clima, mientras que algunos factores están relacionados con la operación como la velocidad de los conductores cuando se acercan a la intersección, la distancia o

el tiempo hasta la intersección cuando se activa el amarillo, así como del ciclo semafórico (Elhenawy, 2015). Con las variables anteriores han sido creados modelos para estimar su influencia en el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas. Sin embargo, los simuladores computacionales que empleamos para evaluar la seguridad de una intersección, entre otros factores, no los incluyen.

Esta investigación se enfoca en la obtención de las variables que influyen en el comportamiento de YLR y RLR en intersecciones semaforizadas locales para la creación de un modelo que pueda ser introducido en el simulador AIMSUN de manera que se puedan simular dichos comportamientos.

1.3 Hipótesis

La inclusión de modelos que consideren las variables de velocidad de aproximación a la intersección y la distancia del vehículo hasta la línea de parada, simularán con mayor precisión respecto a los modelos incluidos en AIMSUN, el comportamiento de los vehículos que toman la decisión de cruzar una intersección semaforizada cuando el intervalo verde ha concluido.

1.4 Objetivo

Obtener un modelo de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas con velocidades cercanas al flujo libre para predecir cuando los usuarios cruzan la intersección al concluir el intervalo verde.

2 MARCO TEÓRICO

El presente capítulo se presenta una breve introducción a los beneficios de los semáforos, los requisitos básicos para su colocación, los tipos de control que puede tener, así como algunos conceptos básicos para entender su funcionamiento. Posteriormente se presentan algunos conceptos relacionados con las intersecciones semaforizadas como el nivel de servicio, la accidentabilidad y las zonas creadas dentro del área de influencia de los semáforos, dando pie a la explicación de los modelos de comportamiento vehicular en dichas intersecciones. Se habla brevemente de los principales simuladores computacionales de tráfico, sus áreas de aplicación, así como algunas investigaciones recientes relacionadas con sus mejoras y aplicaciones. Por último, se presenta la teoría para la codificación de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API).

2.1 Semáforos

De acuerdo con Reyes, C.M. y Cárdenas, J. (1994) los semáforos son dispositivos electrónicos que sirven para ordenar y regular el tránsito de vehículos y peatones en calles y carreteras por medio de luces generalmente de color rojo, amarillo y verde, operados por una unidad de control; al respecto SCT (2014) menciona que los semáforos se emplean para desempeñar, entre otras, las siguientes funciones:

1. Alternar periódicamente el tránsito de un flujo vehicular o peatonal para permitir el paso de otro flujo vehicular, a partir del reparto programado del tiempo entre los flujos concurrentes.
2. Regular la velocidad de los vehículos para mantener la circulación continua a una velocidad constante en una vialidad con intersecciones semaforizadas continuas (sincronismo).
3. Controlar la circulación por carriles.

4. Eliminar o reducir el número y gravedad de algunos tipos de accidentes, principalmente los que implican colisiones perpendiculares.
5. Proporcionar un ordenamiento y seguridad del tránsito.

2.1.1 *Requisitos para la colocación de semáforos*

Debido a que la colocación de semáforos en intersecciones también está relacionada con la generación de problemas como el aumento en las demoras para cierto tipo de usuarios, así como el aumento de los accidentes por alcance o cuando se presentan fallas en el sistema eléctrico, entre otros, en SCT (2014) indica que es necesario que se satisfaga uno o más de los siguientes requisitos:

1. *Volumen mínimo vehicular*

Se cumple con este requisito cuando en la calle principal y en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria, existen los volúmenes mínimos indicados en la Tabla 0.1, en cualquiera de las ocho horas de un día representativo.

Tabla 0.1. Criterio para la colocación de semáforos según el volumen mínimo vehicular.

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)
Calle principal	Calle secundaria		
1	1	500	150
2 o más	1	600	150
2 o más	2 o más	600	200
1	2 o más	500	200

Fuente: SCT (2014).

Si la velocidad que comprende el 85 % del tránsito en la calle principal excede de 60 km/hr o si la intersección queda dentro de la zona urbana de una población aislada con 10,000 habitantes o menos, el requisito de volumen mínimo se reduce al 70 % del indicado en la tabla.

2. *Circulación transversal*

Cuando el volumen del tránsito en la calle principal restringe y provoca conflictos a la circulación transversal de vehículos y de peatones.

3. Volúmenes en horas de máxima demanda

Cuando se requieren semáforos en una intersección exclusivamente durante las horas de máxima demanda (ver Tabla 0.2).

Tabla 0.2: Criterio para la colocación de semáforos según el volumen mínimo de vehículos por interrupción del tránsito continuo.

Número de carriles de circulación por acceso		Vehículos por hora en la calle principal (total en ambos accesos)	Vehículos por hora en el acceso de mayor volumen de la calle secundaria (un solo sentido)
Calle principal	Calle secundaria		
1	1	750	75
2 o más	1	900	75
2 o más	2 o más	900	100
1	2 o más	750	100

Fuente: SCT (2014).

4. Volumen mínimo de peatones

Si en la calle principal entran 600 o más vehículos por hora total para ambos accesos; o si 1,000 o más vehículos por hora entran por la calle principal, cuando existe una faja separadora con anchura mayor a 1.20 m, y cruzan 150 o más peatones por hora la calle principal.

Cuando la velocidad que comprende el 85% de los vehículos, exceda de 60 km/hr o si la intersección está en zona urbana con una población con 10,000 habitantes, o menos, el requisito mínimo de peatones se reduce al 70% de los valores indicados.

5. Antecedentes sobre accidentes

Este requisito se satisface si ocurrieron cinco o más accidentes en los últimos doce meses, cuyo tipo sea susceptible de corregirse con semáforos.

6. Amplias fluctuaciones del tránsito en ambos accesos de la intersección

En los casos en que los volúmenes de tránsito en las calles concurrentes varíen considerablemente (un cruce de una vialidad primaria y una calle local), el semáforo accionado por el tránsito resultará más eficaz.

Pueden emplearse otros parámetros para justificar la colocación de semáforos, así como diferentes combinaciones cuando los descritos con anterioridad no se cumplen en su totalidad; sin embargo, debe evaluarse la posibilidad de implementarse otro tipo de soluciones que ocasionen menos demoras en el tránsito.

2.1.2 Tipos de control semafórico

El TRB (2010) indica que de manera general pueden clasificarse los tipos de control semafórico en dos grupos, los predefinidos o fijos, y los actuados o de tiempo variable, dependiendo del control que tengan sobre el tráfico vehicular:

- 1 **Control predefinido o de tiempo fijo:** Consisten en una secuencia fija para el cambio de fases que es repetida en orden. La duración de cada fase también es fija y preestablecida. Sin embargo, la duración de la fase de verde puede ser modificada dependiendo del horario o el día de la semana para ajustarse a las variaciones del tráfico. La combinación fija de la duración de fases y la secuencia de estas dan como resultado una duración del ciclo constante.
- 2 **Control actuado o de tiempo variable:** Consiste en una secuencia definida de fases en la que la duración de cada fase depende de si la fase está en recuperación o el movimiento de tráfico asociado ha presentado una llamada para el servicio a través de un detector. La duración del intervalo verde está determinada por la información de demanda de tráfico obtenida del detector, sujeta a límites mínimos y máximos preestablecidos. La terminación de una fase accionada requiere una llamada de servicio de un movimiento de tráfico conflictivo. Una fase accionada se puede omitir si no se detecta demanda.

Dos intersecciones semaforizadas que se encuentran próximas la una de la otra, en la misma calle, a menudo funcionan como un sistema de señal coordinado, en el cual las fases específicas en cada intersección se operan en un horario común para permitir el flujo continuo de los movimientos asociados a una velocidad definida.

Las señales en un sistema coordinado típicamente operan mediante el uso de un control accionado previamente o coordinado, y las fases coordinadas típicamente sirven a los principales movimientos de la calle. Las intersecciones semaforizadas que no son parte de un sistema coordinado se caracterizan como "aisladas" y normalmente operan mediante el uso de un control totalmente actuado o semiactuado.

2.1.3 *Conceptos básicos*

Con el objeto de comprender el análisis del control de intersecciones con semáforo y en los requisitos para la distribución de sus tiempos, Reyes, C.M. y Cárdenas, J. (1994) recomiendan precisar algunos términos básicos o parámetros de tiempo, para prevenir posibles confusiones:

1. **Indicación de señal:** Es el encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de varias luces al mismo tiempo.
2. **Ciclo o longitud de ciclo:** Tiempo necesario para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.
3. **Movimiento:** Maniobra o conjunto de maniobras de un mismo acceso que tienen el derecho de paso simultáneamente y forman una misma fila.
4. **Intervalo:** Cualquiera de las diversas divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones de señal del semáforo.
5. **Fase:** Parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos. Es la selección y ordenamiento de movimientos

simultáneos. Una fase comienza con la pérdida del derecho de paso de los movimientos que entran en conflicto con los que ganan. Un movimiento pierde el derecho de paso al aparecer la indicación amarilla.

6. **Secuencia de fases:** Orden predeterminado en que ocurren las fases del ciclo.
7. **Reparto:** Porcentaje de la longitud del ciclo asignado a cada una de las diversas fases.
8. **Intervalo de despeje:** Tiempo de exposición de la indicación amarillo del semáforo que sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.
9. **Intervalo todo rojo:** Tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara a circular. Es utilizado en la fase que recibe el derecho de paso después del amarillo de la fase que lo pierde, con el fin de dar un tiempo adicional que permita a los vehículos, que pierden el derecho de paso, despejar la intersección antes de que los vehículos, que lo ganan, reciban el verde. Se aplica sobre todo en aquellas intersecciones que sean excesivamente anchas. También puede ser utilizado para crear una fase exclusiva para peatones.
10. **Intervalo de cambio de fase:** Intervalo que puede consistir solamente en un intervalo de cambio amarillo o puede incluir un intervalo adicional de despeje todo rojo.

2.1.3.1 Movimientos y fases

Las fases son el mecanismo de control básico mediante el cual la eficiencia operacional y la seguridad de una intersección semaforizada es determinada (Akçelik, R., 1998). Cada una de las líneas de espera de la intersección caracterizadas por su dirección, el uso del carril y las preferencias de carril, son llamados movimientos. La fase es el estado de la señal durante la cual uno o más movimientos reciben el derecho de paso.

En la Figura 2.1 se ejemplifica un diagrama de fases simple para una intersección tipo T. Cuatro movimientos, numerados del uno al cuatro, se muestran en la Figura 2.1a. El plan de intersección, el cual muestra el arreglo de los carriles de la intersección se presenta en la Figura 2.1b. El derecho de paso de cada carril está definido de acuerdo a la secuencia de fases y las características de uso y asignación del carril.

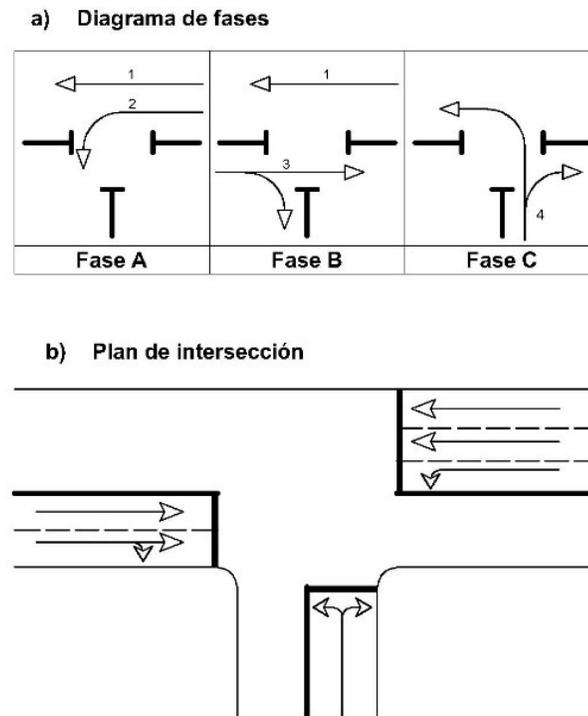


Figura 2.1. Ejemplo de plan de intersección y diagrama de fases.
Fuente: Akçelik (1998).

2.2 Intersecciones semaforizadas

De acuerdo con SCT (2016), se llama intersección al área donde dos o más vías terrestres se unen o cruzan, siendo las intersecciones a nivel aquellas zonas en donde se permite la mezcla de los diferentes flujos de tránsito. Debido a lo anterior es necesario el empleo de dispositivos de control que permitan que la mezcla de flujos se realice de manera ordenada y segura. Las intersecciones semaforizadas emplean semáforos como dispositivos de control. En este

subcapítulo se introducen temas relacionados con la operación de las intersecciones semaforizadas como el nivel de servicio, las causas de los accidentes relacionados con estas áreas y las zonas que son creadas dependiendo de la posición, velocidad y los tiempos semafóricos cuando los vehículos se aproximan a la línea de parada de una intersección semaforizada.

2.2.1 *Nivel de servicio en una intersección semaforizada*

Para Chen *et al.* (2009) el nivel de servicio en una intersección semaforizada se define como una medida cualitativa que describe las condiciones operacionales dentro de la corriente del tráfico, basada en mediciones de servicio como las velocidades y los tiempos de viaje, libertad de maniobrabilidad, interrupciones en el tráfico, confort y comodidad. De acuerdo con Jou *et al.* (2013), el nivel de servicio es un indicador empleado para evaluar la eficiencia operacional de la infraestructura vial, basando su cálculo en el promedio de demoras por vehículo debidas a las esperas y paradas en la intersección (Jou, R.C. y Chen, Y.M., 2013).

El *TRB* (2010), indica que el nivel de servicio se determina al dividir la calidad del servicio en niveles clasificados dentro seis categorías, representadas con las letras de la A a la F, representando cada nivel de servicio un rango de condiciones operacionales y la percepción que el usuario presenta ante dichas condiciones, siendo el nivel A aquel que presenta las mejores condiciones geométricas y operacionales, lo que se traduce con demoras bajas y una comodidad alta en los usuarios; mientras que el nivel de servicio F, representa las condiciones menos favorables para los usuarios, quienes experimentan demoras grandes y una alta inconformidad. En la Tabla 0.3 se enlistan las características de cada uno de los niveles de servicio para intersecciones semaforizadas.

El nivel de servicio de una intersección semaforizada puede ser calculado para la intersección completa, para cada acceso o para cada fase, dependiendo de las condiciones o los requerimientos del estudio. Las demoras cuantifican el incremento

en los tiempos de viaje debido al control de las señales de tráfico, siendo también una medida suplente de la inconformidad de los conductores y del consumo de combustible.

Tabla 0.3. Descripción de las características de los Niveles de Servicio para una intersección semaforizada.

Nivel de servicio	Demoras (s/veh)	Descripción
A	<10	Este nivel se asigna cuando la relación volumen-capacidad es baja y cuando la secuencia de fases es favorable o el ciclo es corto. La mayoría de los vehículos que llegan a la intersección durante la fase de verde cruzarán la intersección sin detenerse.
B	10-20	Este nivel se asigna cuando la relación volumen-capacidad es baja y cuando la secuencia de fases es favorable o el ciclo es corto. Un número mayor de vehículos paran respecto del nivel del servicio A.
C	20-35	Este nivel se asigna cuando la relación volumen-capacidad es baja y cuando la secuencia de fases es favorable o el ciclo es moderado. Se presentan fallas individuales en el ciclo, como que uno o más vehículos en la cola no puedan atravesar la intersección debido a una duración insuficiente del ciclo. El número de vehículos que paran es significativo, aunque muchos vehículos siguen pasando la intersección sin detenerse.
D	35-55	Este nivel se asigna cuando la relación volumen-capacidad es alta y cuando la secuencia de fases es ineficiente o el ciclo es largo. Muchos vehículos se detienen y son notorias las fallas individuales en el ciclo.
E	55-80	Este nivel de servicio se asigna a intersecciones cuya relación volumen-capacidad es alta, la secuencia de fases es desfavorable y el ciclo es largo. Las fallas individuales en el ciclo son frecuentes.
F	>80	Este nivel es asignado cuando la relación volumen-capacidad es muy alta, la secuencia de fases es pobre y el ciclo es largo. En la mayoría de los ciclos es imposible despejar las colas.

Fuente: TRB (2010).

El TRB (2010) menciona que los límites de análisis de la intersección no están definidos como distancias acordadas para todas las intersecciones, si no, que son dinámicas y se extienden desde la intersección hasta abarcar el área de influencia de operación de cada fase de la intersección. Dicha área está relacionada con cada

fase e incluye la distancia máxima de cola esperada para cada fase durante el periodo de estudio. Debido a lo cual, el análisis de los límites de la intersección deberá ser analizados para cada una de las intersecciones estudiadas de acuerdo a sus condiciones durante el periodo de estudio, debiéndose extender el área de influencia al menos 76.2 m (250 pies), medidos desde la línea de parada en cada sentido.

2.2.2 *Accidentabilidad en intersecciones semaforizadas*

Las lesiones por accidentes de tráfico han ido en aumento en las últimas décadas, para el 2010 representaban la octava causa de muertes en el mundo, provocando 1.3 millones de muertes de acuerdo con Yan *et al.* (2016). De acuerdo con Anjana, S. y Anjaneyulu, M.V.L.R. (2015) en algunas ciudades el 24% de los accidentes de tráfico ocurren en intersecciones semaforizadas, en donde un 40% de estos casos están relacionados con lesiones graves o muertes.

Algunos factores que influyen en la seguridad de intersecciones semaforizadas son las medidas de control, la geometría, el tráfico, los usuarios, los vehículos y los factores ambientales (Bauer y Harwood, 2000; Chin y Quddus, 2003; Kumara y Chin, 2003; Tay y Rifaat, 2007; Vogt, 1999; Yan *et al.*, 2005), dichos factores se relacionan el comportamiento vehicular en las intersecciones semaforizadas cuando no se respetan las señales semafóricas provocando que diferentes flujos vehiculares ocupen la intersección al mismo tiempo, estas situaciones se conocen como “Pasarse la luz Amarilla” o *Yellow Light Running* (YLR) y “Pasarse la luz roja” o *Red Light Running* (RLR). De acuerdo con Galatioto *et al.* (2012), el estudio del comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas ha aumentado en las últimas décadas debido al costo humano y financiero, tanto para los usuarios como para las administraciones gubernamentales.

2.2.3 *Zonas creadas en una intersección semaforizada*

De acuerdo con Ghanipoor, S y Abbas, M., (2015) el intervalo amarillo es empleado para advertir a los conductores que la luz roja está punto de aparecer por lo que los conductores perderán el derecho de paso. El cálculo de la duración del intervalo se basa en el tiempo necesario para que los vehículos puedan despejar la intersección de manera segura antes de que se active la fase verde de la siguiente fase, evitando que los vehículos frenen de manera brusca.

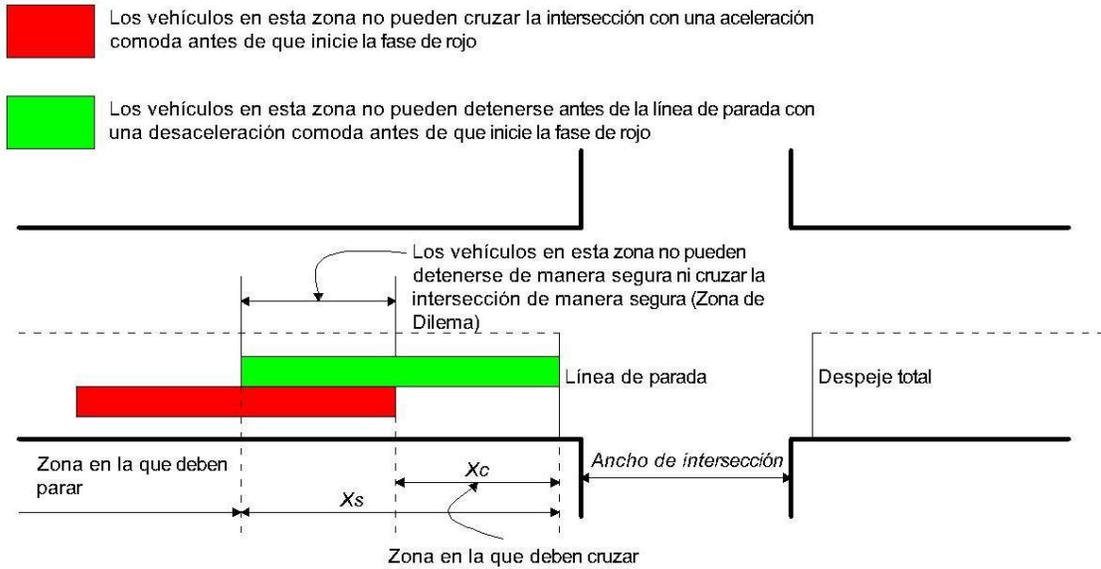
Por su parte Lu *et al.* (2015), advierten que la razón principal de la alta tasa de accidentabilidad en intersecciones semaforizadas se debe a los procesos complejos de toma de decisiones a los que los conductores deben enfrentarse cuando el intervalo amarillo se activa. Al respecto Elmitiny *et al.* (2010), indican que cuando un conductor se encuentra durante el cambio de la fase de verde a amarillo deben tomar una decisión para detenerse o seguir, la cual estará basada en su velocidad y su distancia hasta la línea de parada. Cuando los conductores tomen la decisión de cruzar la intersección cuando se encuentran demasiado lejos de la línea de parada cuando se activa el intervalo amarillo se enfrentarán a comportamientos de tipo RLR o ante conflictos de alcance si el vehículo líder decide parar.

Las velocidades a las que los conductores se acercan a la intersección semaforizada crean dos zonas, la primera conocida como zona de opción, dentro de la cual los conductores circulan a una velocidad menor que el límite máximo permitido, en la que los conductores pueden detenerse antes de la línea de parada o cruzar de manera segura la intersección antes de que la señal cambie a rojo. La segunda se conoce como zona de dilema, en la cual los conductores conducen por arriba del límite máximo de velocidad por lo que no pueden parar de manera cómoda o cruzar la intersección de manera segura sin pasar en luz roja (Papaioannou, 2007). Por último, Lu *et al.* (2015), indican que aunado a la velocidad con la que los conductores se aproximan a la intersección, el ciclo del semáforo y la distancia a la que los conductores se encuentran de la intersección cuando el intervalo amarillo

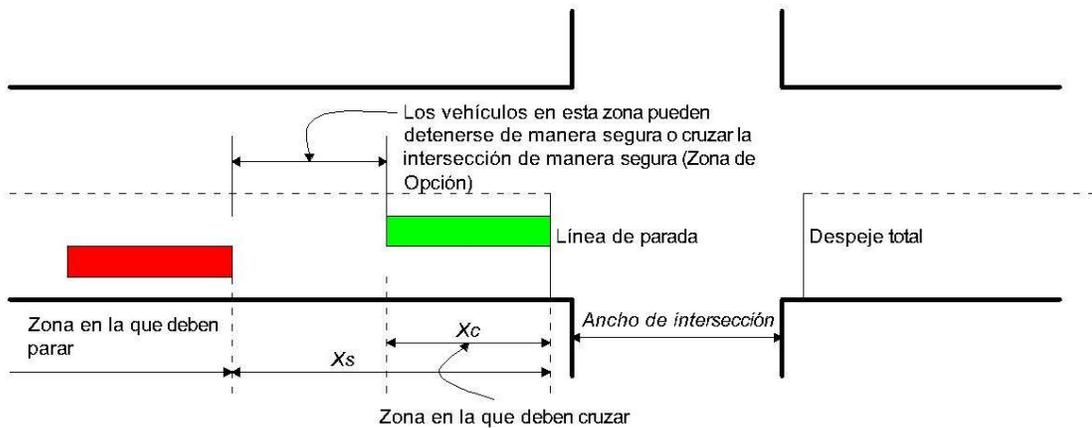
se activa, crean cuatro zonas dentro de las cuales los conductores tendrán comportamientos definidos (ver Figura 2.2):

1. **Zona en la que deben cruzar:** Zona en la que los vehículos pueden cruzar la intersección sin necesidad de aumentar su velocidad o acelerando de manera confortable antes de que el intervalo de rojo se active, pero no pueden detenerse antes de la línea de parada de manera segura.
2. **Zona en la que deben para:** Se caracteriza por que los vehículos en ella no pueden cruzar la intersección antes de que el intervalo de rojo se active, pero pueden detenerse de manera segura antes de la línea de parada con una tasa de desaceleración confortable.
3. **Zona de dilema:** En la que los vehículos no pueden detenerse de manera segura antes de la línea de parada con una desaceleración confortable ni cruzar la intersección sin modificar su velocidad actual o acelerando de manera confortable sin cometer RLR.
4. **Zona de opción:** Indica que los vehículos pueden detenerse antes de la línea de manera segura con una tasa de desaceleración confortable o cruzar la intersección con su velocidad actual o acelerando de manera confortable antes que el intervalo de rojo se active.

Los contadores de señales son dispositivos que pueden modificar las zonas que se crean en una intersección semafórica debido a que los conductores tienen una idea más clara de cuánto durarán las fases en las que se encuentran, lo que puede aumentar la seguridad en este tipo de intersecciones (Islam, M. *et al.*, 2017).



a) Zonas creadas a partir de la Zona de Dilema



b) Zonas creadas a partir de la Zona de Opción

Figura 2.2. Zonas creadas en una intersección semaforzada.

Fuente: Lu *et al.* (2015).

2.3 Modelos de comportamiento vehicular en intersecciones semaforzadas

Barceló J. (2010) indica que el proceso inicial de la modelación de las condiciones de un sistema es la adquisición de conocimiento de la manera en que funciona, posteriormente es necesario transformar las relaciones entre las variables mediante un modelo matemático o en una relación lógica, para que los simuladores

empleen dichos modelos o relaciones y creen representaciones del comportamiento vehicular.

2.3.1 Driver Task Cube

La elección de las variables que intervienen en el comportamiento y toma de decisiones de los conductores puede ser explicada mediante el modelo conceptual propuesto por Summala, H. (1996). Dicho modelo describe la tarea de conducir mediante tres niveles de procesamiento funcional. El primero, hace referencia a la jerarquía funcional que comprende acciones como la elección vehicular, la elección de la ruta, la navegación, la dirección y el control vehicular (derecha de Figura 2.3). En el segundo nivel, se incluyen las capacidades del conductor como la dirección en el carril, el control o la capacidad de evadir obstáculos, el rebase y otras maniobras, la conducción en intersecciones, mantener la distancia entre los vehículos, entre otros (inferior de la Figura 2.3). El último nivel se enfoca en explicar la relación entre el control de Motor-Perceptual que se realiza de manera automática, y la consciente toma de decisiones relacionado con el control de la atención. En este nivel también se incluyen variables psicológicas como el estrés del conductor y la influencia que otros conductores podrían tener en los comportamientos.

Mientras más alta sea la tarea en la jerarquía funcional, más consciente será la toma de decisiones y la supervisión aplicada, dependiendo del nivel de habilidades y automatización, los conductores incluso aprenden a tomar decisiones relacionadas con el viaje y la navegación habitual, sin la necesidad de ser conscientes de dichas consideraciones.

Al incrementar la velocidad por las mejoras en los vehículos y los caminos, se incrementan las distancias que pueden ser alcanzadas dentro de tiempos razonables, por lo que las decisiones de viaje son ampliamente basadas en el tiempo y otros factores de comodidad. Por otro lado, la velocidad influye en el

objetivo motivacional de conducir; las decisiones de viaje establecen el nivel de velocidad deseada, junto con el costo de conducción y los límites de velocidad. De acuerdo con Summala, H. (1996), el control de la velocidad sirve como herramienta de control primario para prácticamente todas las tareas de nivel de conducción; es por ello que los conductores aprenden a ajustar la velocidad para mantener una posición en una línea y las distancias entre vehículos.

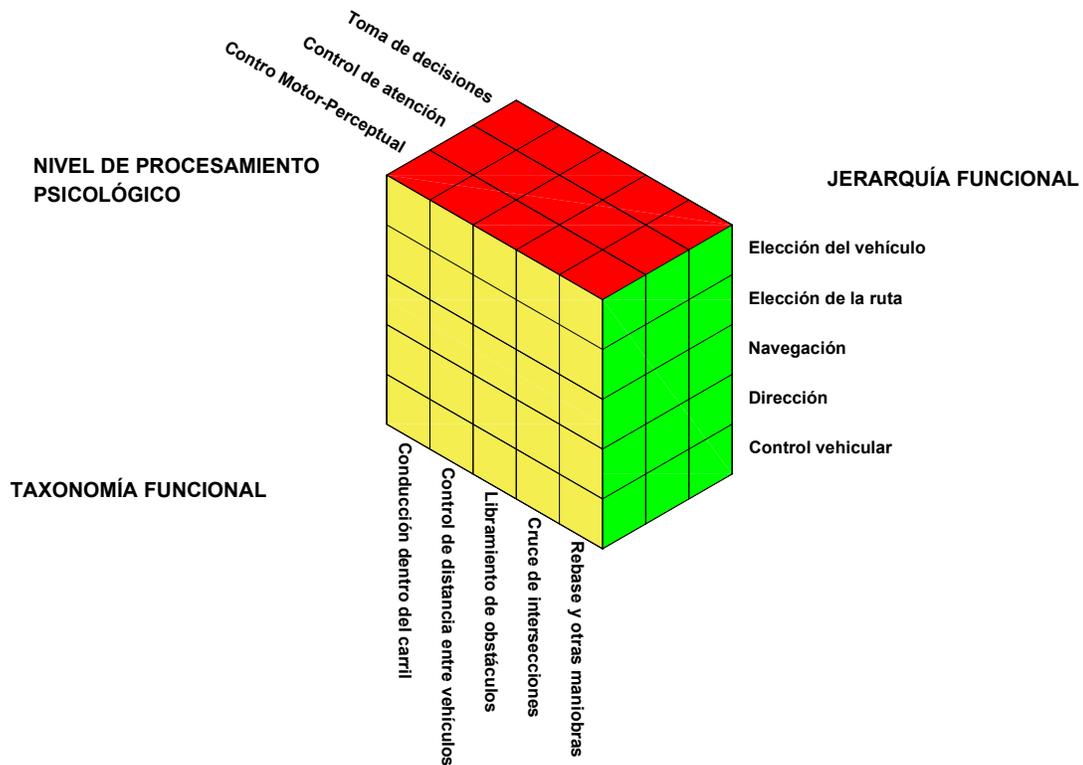


Figura 2.3. Modelo "Driver Task Cube" para la interacción de variables de comportamiento vehicular.

Fuente: Summala, H. (1996).

2.3.2 Variables que intervienen en el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas

Debido a las diversas variables que intervienen en la tarea de conducir, es por lo que resulta importante encontrar la significancia de dichas variables dentro de los comportamientos vehiculares. Diversos investigadores han enfocado sus estudios

en encontrar la influencia de diversos factores que intervienen en la conducción y de esta manera mejorar el rendimiento de los simuladores actuales.

En el estudio realizado por Palat, B. y Delhomme, P. (2016) para analizar las variables relacionadas con el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas, se empleó un simulador de conducción para evaluar el comportamiento de una muestra de conductores ante una serie de pruebas controladas en un laboratorio de movilidad y comportamiento psicológico. También se aplicaron encuestas a los participantes, antes y después de la prueba, para conocer las razones que influenciaron su comportamiento. Se evaluó la influencia que tiene la presión de tiempo en el comportamiento de los conductores (aproximación a la intersección a mayor velocidad, frenados abruptos, incidencia de no respetar las indicaciones del semáforo o la velocidad con la que reinician su trayectoria después de detenerse ante una luz amarilla); así como el contexto social (influencia en la que otros conductores afectan la toma de decisiones).

En los resultados obtenidos del estudio, se concluye que la presión de tiempo no es una variable influyente en la decisión de los conductores para no obedecer las señales semaforicas. También se encontró que la influencia de otros conductores afecta la decisión de no respetar las señales del semáforo, así como el comportamiento cuando el semáforo pasa de rojo a verde respecto a los incrementos mayores en las aceleraciones. Las velocidades con las que los conductores se acercan a la intersección se encuentran relacionadas con la percepción de riesgos; sin embargo, según el estudio, mientras rápido se acerquen los conductores a la intersección, menor es la posibilidad de parar si el semáforo cambia de verde a amarillo.

Por otro lado, un estudio realizado por Elmitiny *et al.* (2010), analizó intersecciones semaforizadas para encontrar las variables que influyen en la decisión de parada abrupta o de cruzar en amarillo, cuando el vehículo se encuentra cerca de la intersección y la luz pasa de verde a amarillo. Según sus hipótesis

planteadas, cuando un conductor se encuentra con el cambio de luz verde a amarillo, requiere realizar una decisión para parar o cruzar la intersección, la cual estará basada en su velocidad y la distancia a la que se encuentra de dicha intersección; por lo que un conductor que se encuentra lejos de la intersección y decida no parar, podría cruzar en rojo, mientras que por el otro lado conductores demasiado precavidos podrían decidir no pasar incluso cuando podrían pasar de manera segura.

De las grabaciones obtenidas en campo, clasificaron los comportamientos vehiculares, dividieron los comportamientos dependiendo de los factores presentados en la Tabla 0.4.

Tabla 0.4. Variables para clasificación de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas.

Variables	Consideraciones
Distancia (en ft)	Distancia de los vehículos hasta la intersección medida desde el inicio de la señal amarilla.
Velocidad (en mph)	Velocidad a la que los vehículos se acercan a la intersección al inicio de la señal amarilla.
Detenerse-Seguir	Según la decisión de los vehículos de detenerse o no cuando la señal indica amarilla (Detenerse= 0; Seguir= 1).
Tiempo (segundos)	Tiempo medido desde el inicio de la señal amarilla hasta la entrada del vehículo a la intersección, si el vehículo decide cruzar la intersección.
Cruzar en rojo	Según la decisión de pasar la intersección si el semáforo indica rojo (no= 0; si= 1).
Líder-Seguidor	Dependiendo si el vehículo se encuentra en una posición de líder o de seguidor en el flujo vehicular (líder= 0; seguidor= 1); si la diferencia entre vehículos era menor de 1 segundo el vehículo se consideraba seguidor del pelotón.
Posición	Indicando la posición vehicular (carril izquierdo= 0; carril central= 1; carril derecho= 2).
Tipo	Tipo de vehículo (vehículo particular= 0; camiones ligeros= 1; vehículos grandes= 2).

Fuente: Elaboración propia con base en Elmitiny *et al.* (2010).

Mediante el análisis de los resultados del estudio, Elmitiny *et al.* (2010) presentan dos modelos de comportamiento vehicular. El primero se relaciona con la decisión de los conductores de continuar o no su trayecto cuando la señal del semáforo indica amarillo, obteniendo que las variables que afectan en mayor medida dicho comportamiento son la distancia, la velocidad y la condición de líder-seguidor del vehículo. De manera similar, presentan un modelo para representar el comportamiento de los vehículos cuando deciden cruzar la intersección en rojo, resultando que las variables más importantes para dicho modelo, son las mismas que en el caso de los vehículos que deciden cruzar en amarillo; siendo la diferencia los porcentajes de afectación de cada variable según sea el caso. En ambos casos, se estudian las variables desde perspectivas diferentes. Palat, B. y Delhomme, P. (2016) consideran aspectos psicológicos y emocionales del conductor, así como su capacidad de tomar decisiones, mientras que Elmitiny *et al.* (2010) consideran sólo los comportamientos observables en intersecciones reales), llegando a la conclusión en ambos casos, que las variables que más influyen en el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas son la velocidad, la distancia del vehículo respecto de la intersección, y la influencia de los conductores según si el vehículo es líder o seguidor del pelotón vehicular.

2.3.3 *Desarrollo de modelos de simulación*

Se ha hablado de la utilidad de los simuladores computacionales y de cómo estos emplean modelos para realizar los cálculos que servirán para que los procesadores realicen una representación en dos o tres dimensiones. Para los fines de esta investigación, el concepto de simulación es el aportado por May, A., (1990):

“Simulación es una técnica numérica para la realización de experimentos en una computadora digital, la cual puede incluir características estocásticas de naturaleza microscópica o macroscópica, y que incluya modelos matemáticos que describan el

comportamiento de un sistema de transporte dentro de periodos de tiempo real.”

Diversos autores han interpretado la simulación de acuerdo a las necesidades de sus investigaciones, pero la mayoría están de acuerdo con la definición anterior y resaltan la importancia de los simuladores como herramientas útiles tanto en la investigación teórica como en las aplicaciones que tiene en la solución de problemas. De manera general, los simuladores de tráfico, son herramientas de simulación que emulan de manera realista el flujo de vehículos individuales a través de una red carretera (Barceló y Casas, 2005).

Como menciona la definición de May, los simuladores necesitan de modelos que matemáticos que describan el comportamiento real. Por otro lado, McFadden afirma que “un estudio del comportamiento de decisión se encuentra descrito por los objetivos de elección y conjuntos de alternativas disponibles para los responsables de tomar las decisiones, así como por los modelos de decisiones y comportamiento individuales, y de distribución de los patrones de comportamiento en la población”, (McFadden, 1973). La teoría de la regresión logística (Logit), es una herramienta popular empleada en el análisis del tráfico, así como para la evaluación de distintos escenarios. Wang, You, y Wang (2017), usaron Logit para hacer frente a la tarea de mejorar las redes de tráfico al centrarse patrones de la red de carreteras, en lugar de centrarse en los conductores. Garrido *et al.* (2014), involuntariamente plantean un punto interesante en su investigación, esto es que empleando solamente la teoría Logit por si misma probablemente no arroje mejores resultados, su enfoque se centra en el uso de otro método, sin embargo, se puede inferir que, al agregar otra herramienta, Logit podría resultar más útil. AIMSUN por su parte, es probablemente uno de los simuladores de tráfico más utilizados, pero enfrenta el mismo problema que cualquier otro simulador, los resultados que puede ofrecer estarán muy influenciados por el proceso de calibración, por lo que un error en el parámetro de calibración dará lugar a un error correspondiente en los

resultados (Figueroa *et al.*, 2014). Diversos investigadores han buscado diferentes métodos para mejorar el proceso de calibración, dentro de ellos, Vilarinho *et al.* (2014), han experimentado con el uso de información en el tiempo real sobre la dinámica de la red, con el objetivo de optimizar el tiempo de la señal para el control del tráfico. Por su parte Madi (2016), decidió enfatizar la dinámica de los vehículos para el proceso de calibración, su trabajo compara las simulaciones obtenidas utilizando AIMSUN con el comportamiento actual de los vehículos en situaciones de reales.

2.4 Simuladores computacionales de tráfico

Dentro de los simuladores computacionales de tráfico comerciales con mayor popularidad se encuentran el VISSIM, Paramics, MITSIMLab (*MIT microscopic traffic simulation laboratory*), DRACULA (*Dynamic Route Assignment User Learning and microsimulation*), DynaMIT (*Dynamic Network Assignment for the Management of Information to Travelers*) y AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks*).

2.4.1 VISSIM

Fellendorf, M. y Vortisch, P. (2010), indican que VISSIM es un simulador de tráfico microscópico de comportamiento basado en el multipropósito para el análisis y optimización de flujos de tráfico, ofreciendo una variedad de aplicaciones urbanas y para autopistas, integrando el transporte público y privado, con la capacidad de visualizar con gran nivel de detalle modelos realísticos de tráfico para condiciones de tráfico complejos.

VISSIM puede ser empleado para la evaluación de niveles de servicio en carreteras como lo discutieron Jolovic *et al.* (2016), mediante el empleo de segmentos de prueba, utilizando las características del programa para el modelado de condiciones reales con alta precisión; o para evaluar propuestas de mejora en la operación de carreteras como Sajjadi, S. y Kondyli, A. (2016), mediante la

evaluación de diferentes escenarios ante la adecuación de carriles especiales para el control de tráfico. De manera similar Muniruzzaman *et al.* (2016) emplearon el VISSIM para la calibración y validación de modelos de flujo de tráfico heterogéneo en ciudades en desarrollo debido a la capacidad del programa para predecir el comportamiento del tráfico en las intersecciones urbanas, así como en carreteras.

2.4.2 *Paramics*

Desarrollado por la empresa consultora en planeación de transporte llamada SIAS, con sede en Edimburgo, Escocía desde 1974; fue el resultado de una serie de programas previos enfocados a la evaluación y comportamiento de redes de transporte. Su predecesor NESA (*Network Evaluation from Survey and Assignment*) era empleado para la evaluación de diferentes esquemas de transporte, así como para medir el impacto en el tráfico y en la economía en el área de influencia de un estudio. En 1986 SIAS creó un prototipo para la modelación de vehículos individuales, pasando de los análisis macroscópicos a los microscópicos, presentando en el año 2000 la versión comercial de Paramics (Sykes, P., 2010). Con base en Ratrou *et al.* (2015), Paramics es parte de una serie de simuladores de tráfico que permiten al usuario visualizar de manera gráfica escenarios de tráfico de manera microscópica, resultando una herramienta útil para el estudio de problemas de transporte y para el análisis de sistemas complejos que requieren en un gran número de secuencias de cálculo, con el objetivo de proveer al usuario datos y medidas estadísticas que son esenciales para la resolución de problemas en la ingeniería de tráfico.

Al igual que otros microsimuladores, Paramics emplea modelos para representar los movimientos laterales y longitudinales de los vehículos individuales, los cuales se basan principalmente en los modelos de seguimiento vehicular, cambio de carril y la aceptación del espaciamiento (Ratrou *et al.*, 2015). Sin embargo, debido a la aleatoriedad del comportamiento vehicular, los modelos empleados en las simulaciones incorporan parámetros necesarios que hacen difícil

la calibración de la simulación (Dowling *et al.*, 2004). Debido a lo anterior, algunas de las aplicaciones que los investigadores le han dado a Paramics se centran en la calibración de los modelos para diversas situaciones, como adecuar las simulaciones a las condiciones globales de la red mediante múltiples enfoques (Ratrouf *et al.*, 2015; Reza *et al.*, 2016; Prusty, S. y Phadnis, R., 2014, Memon *et al.*, 2016). En Yang *et al.* (2013), emplean Paramics para la evaluación de dispositivos de control de tráfico mediante la simulación de las condiciones esperadas. De manera similar, Chen *et al.* (2016) usan Paramics para evaluar la afectación que se tendrá en las condiciones de una vialidad posteriores a ciertas modificaciones en los carriles.

2.4.3 MITSIMLab

MITSIMLab es un microsimulador de tráfico que evalúa el impacto de diversos diseños de sistemas para la administración del tráfico, de sistemas de información de viaje, de control de la operación de transporte público, así como diversas estrategias para sistemas inteligentes de transporte para una mejor operación y asistencia para su mejora (Ben-Akiva *et al.*, 2010). Para Ciuffo, B. y Lima, C. (2014), los procesos de calibración y validación tienden a aumentar en la prioridad de los modeladores de transporte y de los profesionales relacionados con el transporte, ya que el uso de tales herramientas se está extendiendo rápidamente lo que repercute en la mejora progresiva de sus modelos; por lo que emplearon MITSIMLab para evaluar la calibración de modelos mediante análisis de sensibilidad. De manera similar en Balakrishna *et al.* (1999) se reporta un estudio para evaluar la calibración de los parámetros de demanda y suministro de entrada de los modelos de simulación de tráfico microscópico.

Para Toledo *et al.* (2015), la simulación microscópica del tráfico es una herramienta importante para el análisis de los sistemas de transporte inteligente; por lo que presentan modelos y aplicaciones para el MITSIMLab, describiendo sus componentes principales ilustrando diversos ejemplos.

2.4.4 DRACULA

DRACULA fue desarrollado como una herramienta para la investigación dinámica entre la demanda y las interacciones de suministro en la red de carreteras. Por lo tanto, el énfasis está en la microsimulación integrada de la toma de decisiones de los viajes individuales, experiencias de viaje y el aprendizaje. Esto se representa mediante un modelo de asignación dinámica microscópica, basado en la modelación explícita de las rutas elegidas por los individuos diariamente, sus opciones respecto a los tiempos de salida y como sus experiencias pasadas y conocimientos de la red influyen en las decisiones futuras. Por lo que es un detallado microsimulador de tráfico basado en las reglas de seguimiento vehicular y cambios de carril (Liu, R., 2010). Liu *et al.* (2005), presentan algunos ejemplos de la aplicación de DRACULA, incluyendo: estudios de sensibilidad del impacto de la variabilidad diaria, la aplicación en la evaluación de alternativas de políticas de control de señales y la evaluación de carriles exclusivos para autobuses.

Bonsall *et al.* (2005), estudiaron la validación de los modelos empleados por el microsimulador DRACULA respecto de la seguridad, partiendo de que dichos modelos hacen suposiciones a cerca del comportamiento de los conductores que podrían no relacionarse con las condiciones reales respecto de la seguridad. En Flötteröd, G. y Liu, R. (2014), se reporta el empleo de DRACULA para la evaluación de modelos de asignación de matrices origen-destino para procesos de asignación dinámica de tráfico.

2.4.5 DynaMIT

Con base en Ben-Akiva *et al.* (2010), el DynaMIT es un simulador basado en modelo de Asignación Dinámica del Tráfico (DTA por sus siglas en inglés), que estima y predice las condiciones del tráfico. Su desarrollo estuvo a cargo de la Administración Federal de Carreteras del Departamento de Transporte de Estados Unidos de América para los Sistemas Avanzados de Información de Viaje. Debido

a que, mediante la información proyectada a los conductores en tiempo real en los dispositivos de control dinámico de tráfico, podrían empeorarse las condiciones en la red mediante una reubicación de la congestión en otros puntos dentro del sistema, especialmente cuando el número de paneles de información de viaje es alto. DynaMIT suministra información anticipada relacionada con las condiciones reales que el conductor experimentará en la red. Para Antoniou *et al.* (2011), la DTA enlaza los modelos de la red y la demanda en el transporte para estimar las condiciones prevalecientes en el tráfico, predecir el rendimiento futuro de la red y generar rutas de guiado para los conductores de manera consistente y anticipada, por lo que emplearon el DynaMIT para la calibración de los enfoques usando contadores, sensores convencionales de velocidad y densidad.

Por las características de DynaMIT, Balakrishna *et al.* (2008), lo emplearon para estudiar la administración de la red vial ante emergencias. El objetivo era emplear el simulador para encontrar maneras de actuar en las emergencias o eventos no planeados, así como entrenar al personal encargado de la administración en estos casos; y concluyeron que el modelo de simulación en tiempo real podría emplearse como herramienta para el manejo de eventos no planeados. De manera similar Ben-Akiva *et al.* (2012), estudiaron la Asignación Dinámica del Tráfico para condiciones de saturación de la red, para conocer la validación de los modelos del DynaMIT para las condiciones reales.

2.4.6 AIMSUN

Sistema de simulación de transporte creado como programa de investigación a largo plazo por la Universidad de California (Ferrer, J. y Barceló, J., 1993; Barceló *et al.*, 1994). Las principales áreas de aplicación de AIMSUN son la ingeniería del tráfico y, más recientemente, el apoyo en línea a las decisiones de gestión de tráfico (en tiempo real). En cualquier caso, el uso de AIMSUN o AIMSUN Online tiene como objetivo proporcionar soluciones a corto y mediano plazo en problemas de planificación y operación para los que la dinámica y los modelos desagregados de

seguimiento vehicular y cambio de carril son muy adecuados. Originalmente el AIMSUN estaba planeado para simulaciones microscópicas de tránsito, actualmente el programa también es capaz de realizar simulaciones mesoscópicas y macroscópicas (Casas *et al.*, 2010). Con base en Chiappone *et al.* (2015), numerosos problemas en la ingeniería y en la ciencia en general requieren la optimización del rendimiento de los modelos, minimizando el error entre los datos aportados por el modelo y los observados en campo, por lo que basaron su estudio en la calibración de los modelos empleados por el microsimulador considerando las relaciones de velocidad-densidad. Para Yazan, M. (2016), la precisión de los datos de actividad de los vehículos generados por el modelo de microsimulación dependen de cómo los modelos representan a dichos vehículos, por lo que resulta importante que el modelo empleado reproduzca la misma variabilidad en el comportamiento de los vehículos en la realidad; así, analizaron enfoques relacionados en cómo la dinámica de los vehículos es representada en los modelos de microsimulación de AIMSUN y encontraron que las distribuciones de los parámetros dinámicos del vehículo, en específico, la velocidad máxima deseada y la aceleración, además del percentil 95 de la desaceleración normal, han representado en el simulador un comportamiento realista del vehículo al comparar con los valores observados en el mundo real.

Al igual que los simuladores presentados con anterioridad, las aplicaciones que se le pueden dar al AIMSUN son variadas, Barceló *et al.* (2005), evaluaron el uso de este microsimulador como herramienta para el diseño, análisis y evaluación de sistemas inteligentes de transporte. En Dorado, M. y Obregón, S. (2016) se reporta la implementación y desarrollo de un algoritmo un enrutador de vehículos en tiempo real. Mientras Anya *et al.* (2014), estudiaron la aplicación de los modelos incluidos en AIMSUN para estimar las emisiones de contaminantes, y en el mismo sentido Obregón *et al.* (2016) evalúan las emisiones contaminantes y consumo de combustible resultantes por la dispersión urbana de la zona metropolitana de

Querétaro, mientras en Vásquez, C. y Obregón, S. (2017) determinan la geometría y espaciamientos adecuados para mitigar emisiones y consumo de combustible debidos a la falta de reglamentación de los reductores de velocidad en el municipio de Querétaro.

2.5 Programación de API's

La simulación computacional, como indican Fang *et al.* (2013), resulta en una herramienta disponible para la evaluación de diversas situaciones relacionadas con el transporte y operación, como lo son estrategias para la mejora de los sistemas o algoritmos antes de ser implementados en el campo. Sin embargo, el reto de la implementación de nuevas tecnologías dentro de las simulaciones como el control de señales en tiempo real o el empleo de sistemas de posición geográfica (GPS) que ayuden al enrutamiento vehicular no están disponibles en la mayoría de los modelos de simulación. En TSS (2013) se menciona que si bien la tendencia actual en el desarrollo de aplicaciones para el transporte se enfoca en la inclusión de nuevas tecnologías para el control y mejora de los sistemas, estos modelos están lejos de ser estandarizados y es por eso que se dificulta la inclusión en los simuladores actuales, por lo que simuladores como el AIMSUN permiten el intercambio de información entre aplicaciones definidas por el usuario y el ambiente del simulador a través de Interfaces de Programación de Aplicaciones (API's).

Mediante el uso de una API es posible que el usuario realice cambios en la simulación como las conductas de los conductores, modificaciones a los planes de control, entre otros (Fang, C., 2008). Vilarinho *et al.* (2014) y Vilarinho y Tavares (2014) emplearon API's para mejorar la capacidad de simulación del AIMSUN incluyendo una optimización de los tiempos semafóricos del plan de control con información dinámica del tráfico. Ntousakis *et al.*, (2015) usaron API's para AIMSUN para poder evaluar la comodidad y seguridad de un plan control adaptativo en una intersección; de manera similar con el uso de una API Rauh *et al.*, (2016), mejoraron

el plan de control semafórico en AIMSUN cuando se tiene la presencia de vehículos autónomos.

2.5.1 Programación en AIMSUN

Según Casas *et al.* (2010), el programa AIMSUN incluye una interfaz de programación de aplicaciones, la cual es una herramienta o modulo que le da al programa la capacidad de relacionarse, con prácticamente cualquier aplicación externa que pueda emplear algunos de los objetos del simulador. De igual manera, el programa incluye un *kit* de desarrollo de *software*, el cual es un conjunto de librerías que permiten a cualquier usuario o compañía el desarrollo de aplicaciones para o basadas en AIMSUN. Debido a estas facilidades, en esta investigación se empleará este programa para la implementación de los modelos en las simulaciones. De acuerdo con TSS (2013), la tendencia actual para el desarrollo de nuevos sistemas de control inteligentes hace que los simuladores se queden rezagados ante la incapacidad de incluir modelos específicos basados en enfoques dirigidos a situaciones actuales.

2.5.2 Principios para la creación de modelos en AIMSUN

De acuerdo con Barceló, J. (2010), la creación de modelos de simulación de transporte con AIMSUN, es un proceso iterativo que comprende tres pasos:

- Construcción del modelo, es el proceso de reunión y análisis de las variables para la creación del modelo.
- Verificación del modelo, calibración y validación, el cual es el proceso de la confirmación de parámetros y la comparación de los datos arrojados por el modelo, respecto de los datos obtenidos en campo, para comprobar su validez.
- Análisis de los valores obtenidos, es el aprovechamiento de los valores obtenidos del programa respecto de los objetivos generales del estudio de la modelación.

2.5.3 *Sistemas de simulación de transporte*

Para Shahzad, M. y Ranjitkar, P. (2009), los modelos de microsimulación están ganando aceptación como herramientas prometedoras para la evaluación y análisis de sistemas inteligentes de transporte y otros mecanismos de control de tráfico, así como del manejo de medidas, para los ingenieros de transporte y especialistas en el transporte. Los modelos microscópicos describen las entidades del sistema y su interacción con un alto nivel de detalle. Su aplicación en la resolución de problemas complejos de ingeniería vial ha recibido popularidad, así como críticas. La capacidad de utilidad en la predicción de diversos factores como lo son la velocidad de deseo y la aceptación de seguimiento, así como el análisis de las condiciones de tráfico muestra un gran potencial por explorar. Dichos modelos trazan y graban los movimientos individuales de los vehículos, lo cual ayuda y permite el análisis de pruebas de un amplio rango de configuraciones de carreteras y condiciones de operación, que por mucho exceden los límites de las herramientas tradicionales de análisis. Adicionalmente, los actuales modelos de microsimulación incluyen interfaces de usuario altamente sofisticadas, que permiten representaciones visuales y demostraciones de la operación del tráfico, que no eran posibles con anteriores herramientas computacionales.

2.5.4 *Modelo de seguimiento de Gipps*

El modelo de seguimiento vehicular implementado en AIMSUN está basado en el modelo propuesto por Gipps (1980). El modelo tiene dos componentes: aceleración y desaceleración: el primero representa la intención del vehículo para alcanzar una velocidad de deseo, mientras que el segundo reproduce las limitaciones impuestas por el vehículo líder cuando trata de alcanzar la velocidad de deseo. Este modelo establece que la velocidad máxima a la que un vehículo (n) puede acelerar durante un periodo de tiempo $(t, t + T)$ está dada por:

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)} \right) \sqrt{0.025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}} \quad \text{Ecuación 0.1}$$

Donde:

$V(n, t)$ es la velocidad del vehículo n al tiempo t .

$V^*(n)$ es la velocidad de deseo del vehículo (n) en su posición actual.

$a(n)$ es la máxima aceleración para el vehículo n .

T es el tiempo de reacción.

Por otro lado, la máxima velocidad que el mismo vehículo (n) puede alcanzar durante el mismo intervalo $(t, t + T)$, de acuerdo con las propias características y limitaciones impuestas por el vehículo líder ($n-1$), es:

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2(x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)) - V(n, t)T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right]}$$

Ecuación 0.2

Donde:

$d(n) (< 0)$ es la máxima desaceleración deseada para el vehículo n .

$x(n, t)$ es la posición del vehículo n en el tiempo t .

$x(n-1, t)$ es la posición del vehículo líder ($n-1$) en el tiempo t .

$s(n-1)$ es la longitud efectiva del vehículo ($n-1$).

$d'(n-1)$ es una estimación de la desaceleración del vehículo ($n-1$).

De esta forma, la velocidad mínima del vehículo estará dada por el resultado menor entre la ecuación 1 y la ecuación 2. La posición del vehículo dentro del carril

es calculada tomando en cuenta la velocidad mínima del vehículo según la siguiente ecuación:

$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T)T \quad \text{Ecuación 0.3}$$

El modelo de seguimiento vehicular propuesto por Gipps, sólo considera al vehículo y su líder. AIMSUN también considera la influencia de los carriles adyacentes; de esta manera, cuando un vehículo se mueve a lo largo de un carril, se considera la influencia de los vehículos que conducen a una velocidad menor puedan tener en el vehículo; determinando una nueva velocidad máxima de deseo en la sección que será empleada en el modelo de seguimiento, considerando la velocidad con la que los vehículos viajan en la misma dirección que el vehículo en el carril adyacente con velocidades menores, permitiendo una mayor diferencia de velocidades.

2.5.5 *Modelo de cambio de carril*

Por otro lado, el modelo de cambio de carril empleado por AIMSUN, también está basado en un modelo propuesto por Gipps (1986), el cual modela al cambio de carril, como una decisión de proceso, analizando el deseo o necesidad del cambio de carril; los beneficios que la maniobra podría proporcionar; así como las condiciones de factibilidad para un cambio de carril de manera local, en función de la posición del vehículo dentro de la vialidad. Para lograr una mejor representación de la conducta del conductor durante la toma de decisión para el cambio de carril, son consideradas tres zonas dentro de una vialidad (ver Figura 2.4):

1. Zona 1: Es la mayor distancia hasta la siguiente intersección o punto de giro. La decisión de cambio de carril en esta zona está relacionada con las condiciones del tráfico. Las necesidades de cambiar de vialidad aún no son consideradas. Se consideran parámetros como la velocidad de deseo del conductor, la distancia y la velocidad del vehículo líder y la velocidad y

distancia del futuro vehículo líder si se efectuara la maniobra para medir los beneficios que el conductor tendría por realizar el cambio de carril.

2. Zona 2: Zona intermedia. El deseo de cambio de vialidad influye en la decisión de cambio de carril. Los vehículos tienden a acercarse al lado de la vialidad hacia donde podrían cambiar de vialidad. El comportamiento de los vehículos no se ve modificado por los comportamientos de los conductores en los otros carriles.
3. Zona 3: Es la distancia más corta hasta el punto de intersección. Los vehículos son forzados a permanecer en los carriles dependiendo de su próxima dirección, reduciendo su velocidad si es necesario o incluso detenerse para poder completar sus maniobras.

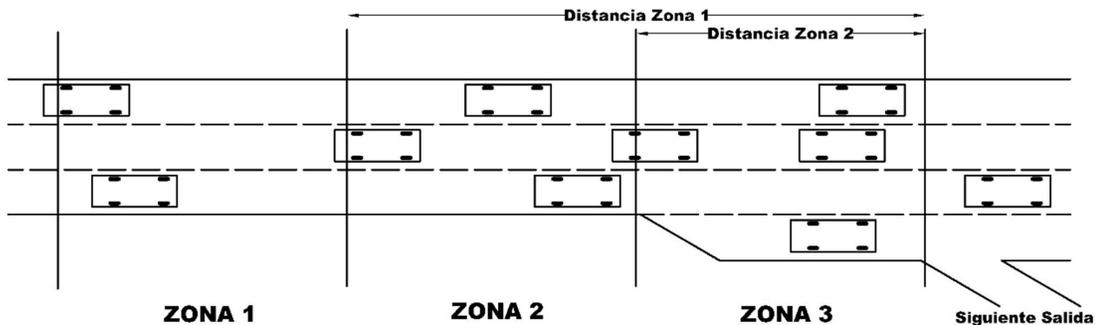


Figura 2.4. Zonas para el cambio de carril del modelo de Gipps.

Fuente: Casas *et al.* (2010).

3 METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el procedimiento para cumplir con el objetivo de la presente tesis, basándose en tres ejes principales, el primero enfocado en el estudio comportamiento actual del simulador AIMSUN en intersecciones semaforizadas, en el segundo se presenta la secuencia de tareas necesarias para la obtención de un modelo de comportamiento vehicular; por último, se procede con la implementación en AIMSUN del modelo obtenido, evaluando las mejoras mediante la validación con situaciones reales (Figura 3.1).

Para el análisis del desempeño del simulador AIMSUN, fue necesaria la creación de escenarios en intersecciones semaforizadas de prueba para comprender la forma en que el simulador representa el comportamiento de los vehículos cuando estos se aproximan a una intersección controlada por semáforos de tiempo fijo. Para poder recolectar la información del comportamiento vehicular en esta sección fue necesaria la creación de una API.

La selección de la intersección de estudio, así como las condiciones bajo las que se obtuvieron los datos de demanda y caracterización de las condiciones de tráfico se consideran en la sección dos; con el objeto de obtener un modelo de comportamiento vehicular para intersecciones semaforizadas.

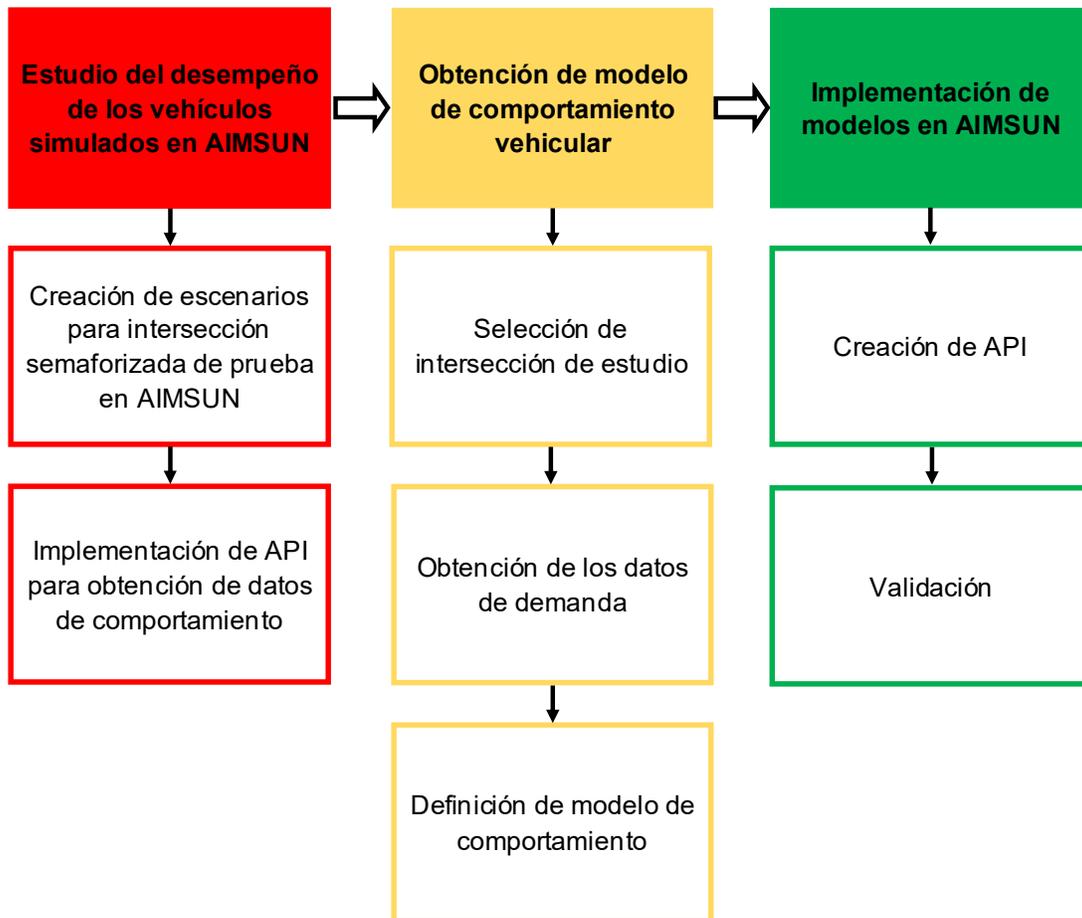


Figura 3.1. Diagrama de flujo de la metodología.

Fuente: Elaboración propia.

3.1 Estudio de comportamiento vehicular en simulador

3.1.1 Elección de simulador a emplear

Como se ha visto con anterioridad existe una amplia variedad de programas empleados para realizar simulaciones computacionales para el comportamiento vehicular dentro de una red. Dorado, M. (2014), menciona que para la elección de la herramienta computacional debe seleccionarse aquella que acepte controles externos, los cuales puedan ser desarrollados por el usuario. En el caso de este proyecto se pretende que pueda modificarse el comportamiento de los vehículos cuando se encuentren cerca de una intersección semaforizada.

El Módulo que permite este desarrollo se llama AIMSUN API, el cual trabaja con rutinas hechas dentro del lenguaje de programación Python o Visual C++. Mediante la utilización de las funciones de AIMSUN se pueden modelar los atributos de elementos de control de tráfico como se muestra en la Figura 3.2.

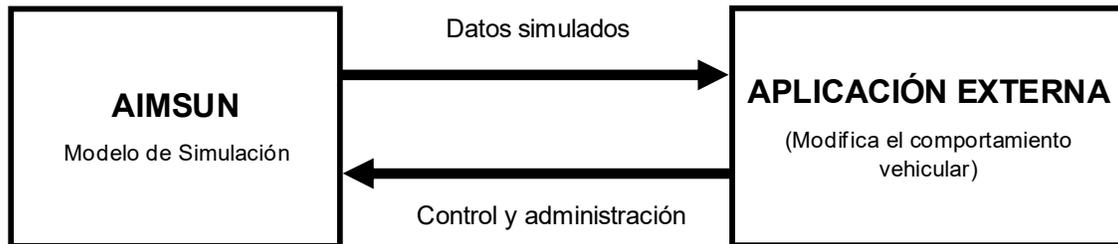


Figura 3.2. Esquema de funcionamiento de un control externo en AIMSUN.

Fuente: TSS (2013).

En consecuencia, el simulador AIMSUN en su versión 7.0 será el empleado para realizar los experimentos y la posterior implementación del modelo de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas.

3.1.2 Creación de intersección de prueba

Para poder comprender el comportamiento de los vehículos dentro del *software* AIMSUN cuando se realizan simulaciones en intersecciones semaforizadas fue necesaria la creación de una intersección de prueba; de manera que se obtenga información de las características que son posibles modificar en el simulador, así como de los parámetros que emplea para realizar las simulaciones.

En la Figura 3.3 se presenta el grafo de la intersección semaforizada de prueba. Se trabaja sobre una intersección de cuatro accesos, cada uno con dos sentidos de circulación. Los accesos de los sentidos de norte a sur y sur a norte cuentan con dos carriles por sentido, mientras que los sentidos de este a oeste y su sentido contrario solo cuentan con un carril por sentido.

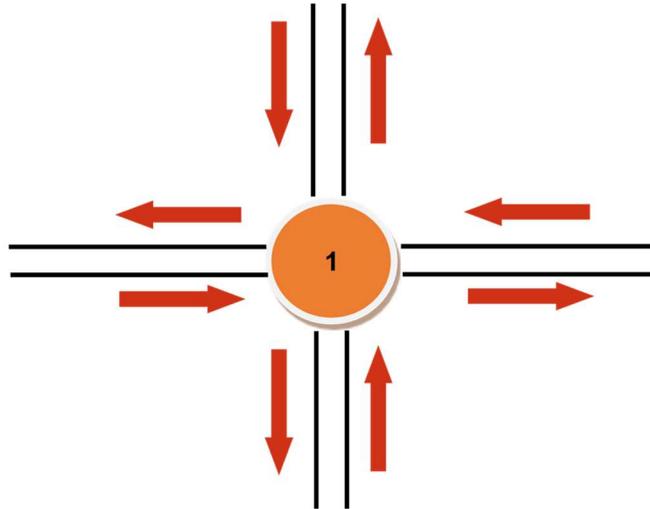


Figura 3.3. Grafo de intersección semaforizada de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3 Incorporación de características vehiculares

Al crear la intersección semaforizada propuesta en la sección 3.1.2, en el software AIMSUN se obtiene la red representada en la Figura 3.4.

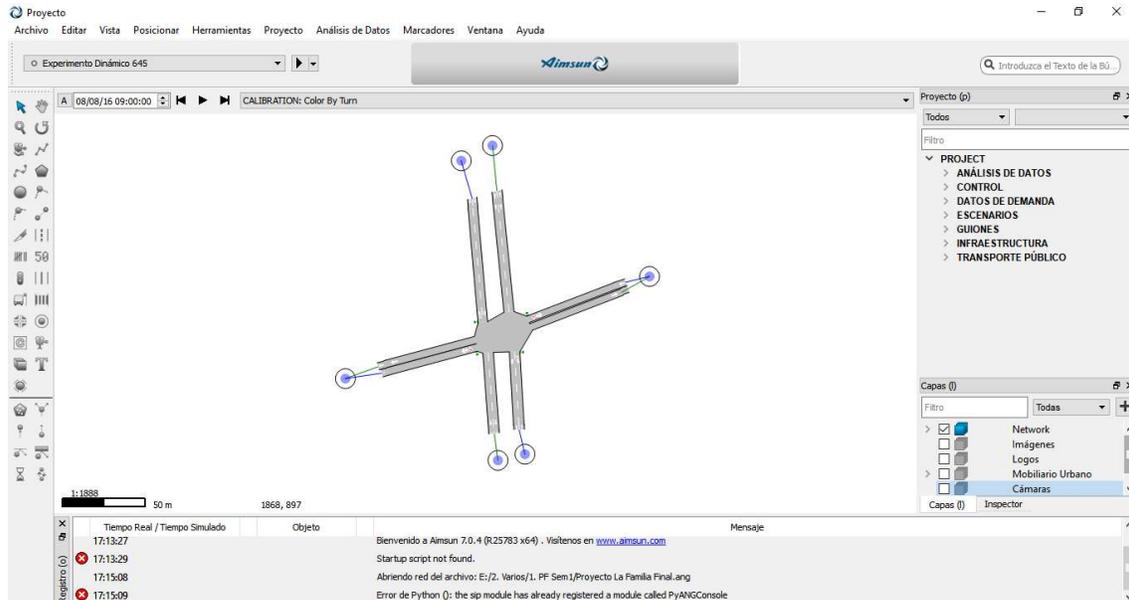


Figura 3.4. Intersección semaforizada de prueba implementada en AIMSUN.

Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de datos de esta sección se simularán solamente vehículos compactos, por lo que se cargó solamente un tipo de vehículo. Para las características de los vehículos se emplearon las características de los vehículos que transitan con mayor frecuencia en Querétaro de acuerdo con Ramírez, E. (2012), los cuales están representados en la Tabla 0.5.

Tabla 0.5. Ficha técnica de los modelos de vehículos que transitan con mayor frecuencia en Querétaro.

Auto A2	Dimensiones		
	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)
Audi A3	4.238	1.765	1.421
AudiS3	4.23	1.765	1.399
Aveo 2009	3.92	1.68	1.505
Aveo Sedan	4.31	1.71	1.505
Chevrolet Agile	3.996	1.939	1.539
Chrevrolet Astra	4.2	1.989	1.431
Chrevrolet Aveo 2012	4.315	1.709	1.506
Chrevrolet Celta	3.799	1.857	1.408
Chevrolet Corsa	2.491	1.646	1.43
Chevrolet Meriva	4.042	1.944	1.573
Chevrolet Spark	3.64	1.91	1.522
Chevrolet Vectra	4.618	2.017	1.458
Chevrolet Zafira	4.317	1.742	1.689
Classic Wagon	4.056	1.768	1.448
Clio Grand Tur	4.228	1.719	1.513
Cruze	4.597	1.788	1.477
Ford Fiesta 2011	3.95	1.722	1.481
Ford Focus 2012	4.358	1.823	1.484
Ford Fusion 2010	4.013	1.724	1.543
Ford Mustang 2010	4.765	1.877	1.382
Ford Shelby Cobra	4.292	1.943	1.194
Fprd Taurus	5.154	1.935	1.542
Golf Plus	4.206	1.759	1.58
Ibiza ST	4.227	1.693	1.445
Jetta 2010	4.402	1.735	1.438
Sail	4.249	1.69	1.495
Smart	3.495	1.495	1.5
Sonic Sedan	4.399	1.735	1.517
Toyota Auris	4.245	1.76	1.515
Tsuru 2012	4.325	1.65	1.381

Fuente: Ramírez, E. (2012).

Los parámetros estadísticos requeridos para ingresar en el *software* se obtuvieron de Dorado, M. (2014), y se presentan en la Tabla 0.6.

Tabla 0.6. Parámetros estadísticos de los vehículos que transitan con mayor frecuencia en el estado de Querétaro.

Largo (m)				Ancho (m)			
Media	Des. Est.	Max	Min	Media	Des. Est.	Max	Min
4.2415	0.4501	5.15	2.49	1.7595	0.1182	2.01	1.49

Fuente: Dorado, M. (2014).

Se configuran las características del vehículo tipo en el programa en la sección de datos de demanda para los vehículos (Figura 3.5).

Tipo de Vehículo: 53, Nombre: Car

Principal Clases Características Formas 2D Formas 3D Parámetros por defecto del Experimento Combustible Emisión (QUAI)

Nombre: Car ID Externo:

	Media	Desviación	Min	Máx
Longitud	4.24 m	0.45 m	2.49 m	5.15 m
Anchura	1.75 m	0.11 m	1.49 m	2.01 m
Velocidad Máxima Deseada	110 km/h	10 km/h	80 km/h	150 km/h
Aceleración Máxima	3 m/s ²	0.20 m/s ²	2.60 m/s ²	3.40 m/s ²
Desaceleración Normal	4 m/s ²	0.25 m/s ²	3.50 m/s ²	4.50 m/s ²
Desaceleración Máxima	6 m/s ²	0.50 m/s ²	5 m/s ²	7 m/s ²
Aceptación de Velocidad	1.10	0.10	0.90	1.30
Distancia Mínima entre Vehículos	1 m	0.30 m	0.50 m	1.50 m
Tiempo Máximo de Ceda el Paso	10 Segundos	2.50 Segundos	5 Segundos	15 Segundos
Aceptación de Guiado	100 %	0 %	100 %	100 %
Factor de Sensibilidad	1	0	1	1
Intervalo mínimo de tiempo entre vehículos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos

Permanencia en el Carril de Adelantamiento: 0.00 %
 Adelantamiento por el Carril Lento: 0.00 %
 Cambios de Carril Imprudentes: 0.00 %
 Sensibilidad a Cambios de Carril Imprudentes: 1.00

Vehículos equipados: 0.00 %
 Tolerancia de crucero: 0.80 m/s²
 PCUs: 1.00
 Capacidad Máxima: 4.00 Número total de personas

Aceptar Cancelar

Figura 3.5. Datos característicos de los vehículos que transitan en Querétaro introducidos en AIMSUN.

Fuente: Elaboración propia.

Se agregan los datos de demanda para la intersección como se observa en la Figura 3.6. No se cargan movimientos con maniobras de vueltas de manera que los datos no se vean afectados por las disminuciones de velocidad de vehículos cuando realizan los cambios de dirección. Los volúmenes cargados se consideran adecuados para representar velocidades a flujo libre, sin que los vehículos tengan que modificar su comportamiento debido al volumen vehicular.

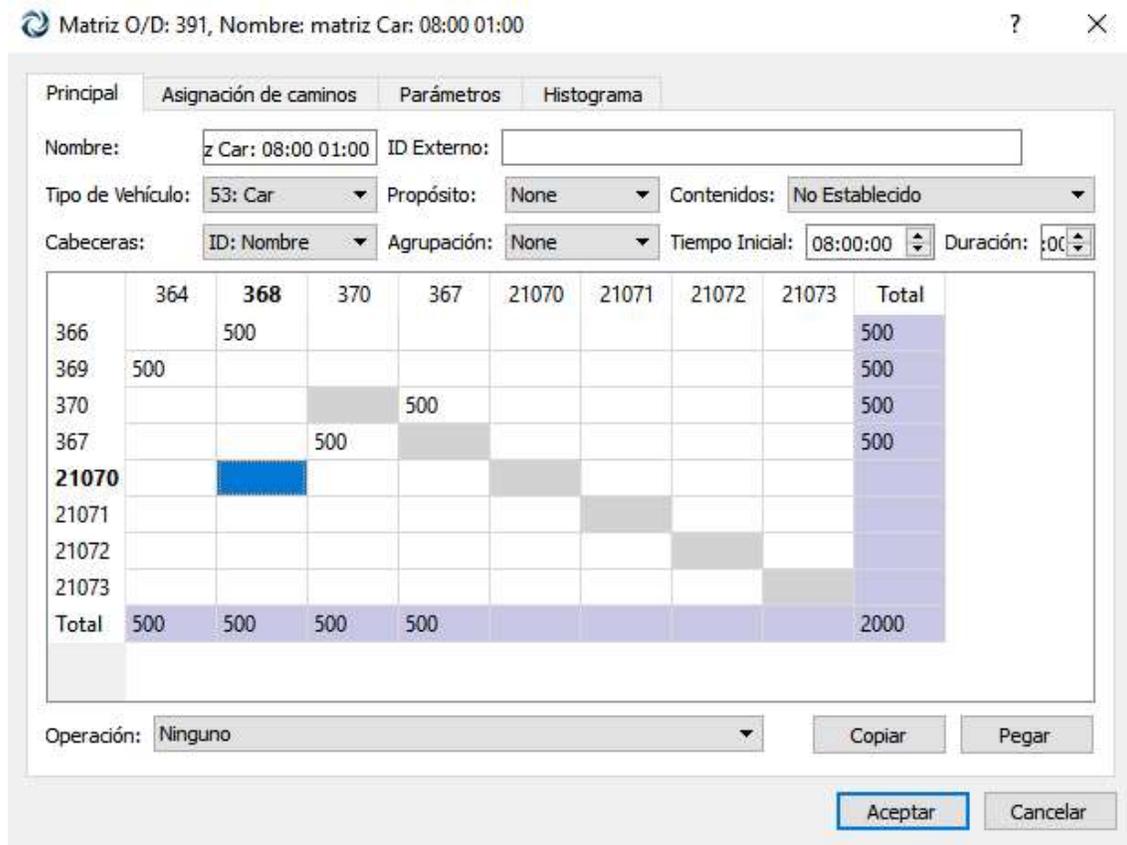


Figura 3.6. Datos de demanda de intersección de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4 Características del plan de control

Se estableció un plan de control maestro mediante controles de accesos fijos con un ciclo de 144 segundos, de tal manera que se tuvieron 25 ciclos en una simulación de una hora. En la Tabla 0.7 se presenta la distribución de las fases.

Tabla 0.7. Distribución del ciclo semafórico en intersección de prueba.

Acceso	Intervalo	Tiempo	Orden
W			2
1	VERDE	00:00:28	
	AMARILLO	00:00:03	
	ROJO	00:01:53	
	TOTAL	0:02:24	
S			4
	VERDE	00:00:38	00:00:31
	AMARILLO	00:00:03	
	ROJO	00:01:43	
	TOTAL	0:02:24	
N			1
	VERDE	00:00:38	00:01:12
	AMARILLO	00:00:03	
	ROJO	00:01:43	
	TOTAL	0:02:24	
E			3
	VERDE	00:00:28	00:01:53
	AMARILLO	00:00:03	
	ROJO	00:01:53	
	TOTAL	0:02:24	

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5 Programación de API para obtención de datos

Empleando el programa Visual Studio se creó una Biblioteca de Enlace Dinámico (DLL) que el AIMSUN interpreta como una API, para leer la información de los vehículos en cada paso de la simulación. El paso de la simulación se estableció en 0.1 segundos para poder obtener la información de los vehículos aproximadamente cuando se han desplazado un metro. La API se conforma de seis funciones para realizar la comunicación con el modelo de AIMSUN:

- Int AAPILoad(): En el escenario del modelo de AIMSUN se ha cargado la ubicación del archivo DLL, este comando ejecuta la API seleccionada.
- Int AAPInit(): Inicia la API. En esta sección pueden incluirse parámetros que serán empleados en las siguientes funciones.

- `Int AAPIManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double acycle)`: Se declaran las variables que controlarán la ejecución del código. El código cargado en esta sección se ejecutará antes del paso de la simulación.
- `Int AAPIPostManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double acycle)`: La única diferencia entre este punto y el anterior es que este se ejecutará posterior al paso de la simulación.
 - `Int AAPIFinish()`: Se finaliza la API.
 - `Int AAPIUUnLoad()`: Se cierra la aplicación en el AIMSUN.

En la Figura 3.7 se puede apreciar la interacción entre el AIMSUN y la API para realizar la simulación. El código empleado en esta etapa fue cargado en la sección `AAPIManage(...)`, de manera que solicitó la información de los vehículos antes de efectuar el paso de la simulación. Los datos que se obtuvieron fueron los siguientes: Identificador (ID) del vehículo, ID de la sección, Número de carril, Distancia hasta la intersección y la Velocidad.

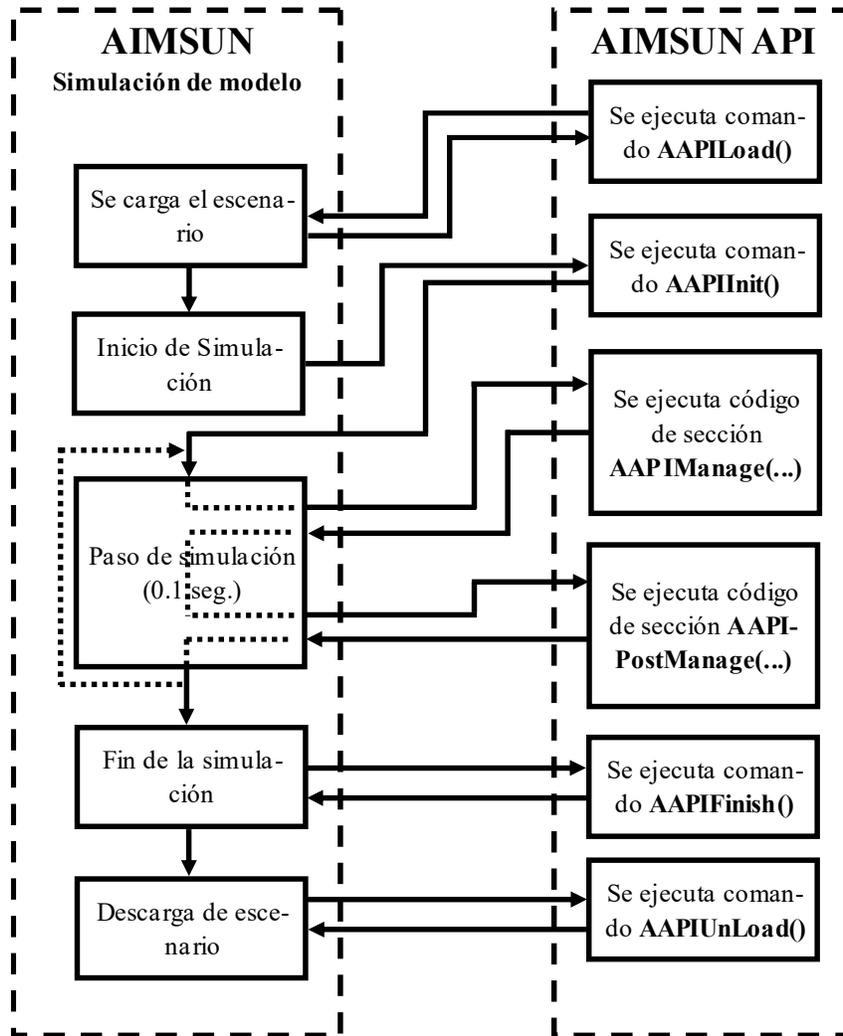


Figura 3.7. Diagrama de flujo de la interacción entre el AIMSUN y la API.

Fuente: TSS (2013).

3.2 Obtención de modelo de comportamiento vehicular

3.2.1 Selección de intersección semaforizada

El lugar de estudio seleccionado se encuentra sobre la carretera estatal Querétaro-Tequisquiapan 200 intersección con la calle Pino Suárez (Ver Figura 3.8).

A continuación, se presentan los criterios para la selección de la intersección semaforizada:

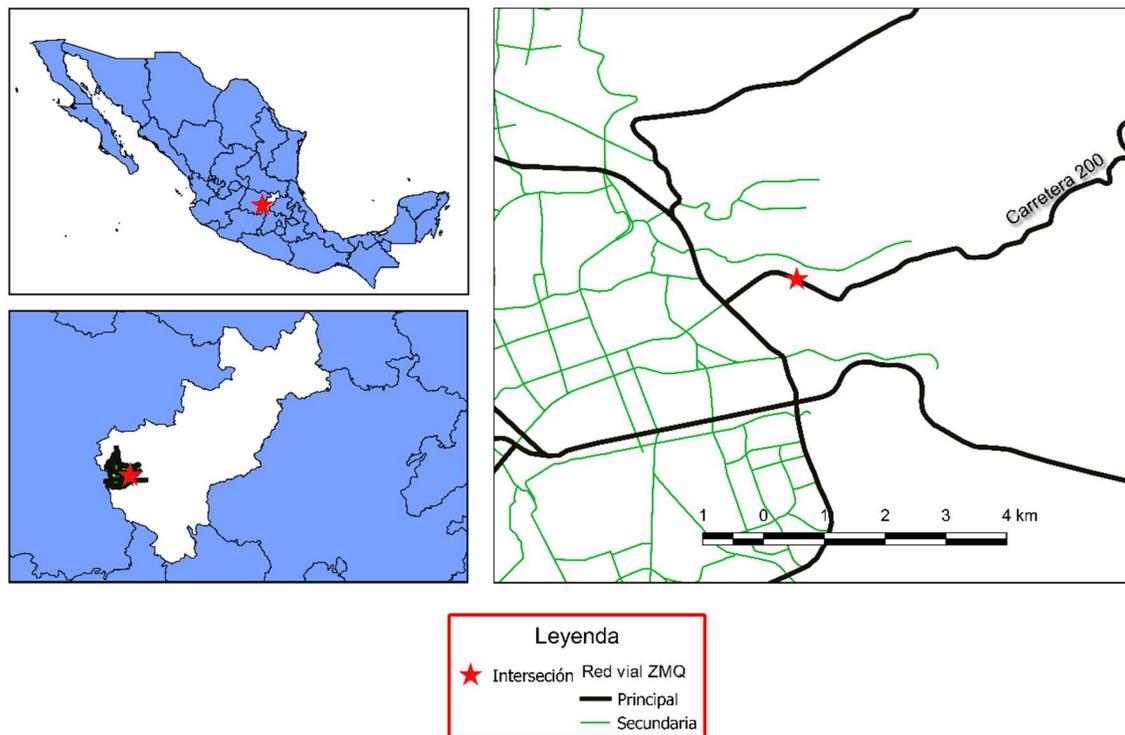


Figura 3.8. Ubicación de la intersección de estudio.

Fuente: Elaboración propia empleando *software* QGIS.

3.2.1.1 Intersecciones no saturadas

La intersección semaforizada elegida para el estudio debe ser aquella en la que los vehículos transiten a velocidades cercanas a las de deseo y en la que las colas sean pequeñas, presentándose demoras que no sean importantes, es decir que los vehículos no permanezcan más de un ciclo en la intersección.

Por las condiciones de la carretera estatal 200 las velocidades de operación vehicular son cercanas a la velocidad de proyecto (60 Km/hr). En las inspecciones en campo no se observaron colas importantes y ningún vehículo permaneció por más de un ciclo en la intersección.

3.2.1.2 Geometría de la vialidad

Será necesario que la intersección de estudio cuente con señalamiento de alerte a los conductores de la proximidad de la intersección semaforizada, así como que el diseño geométrico del área de afección de la intersección sea adecuado para que los conductores puedan observar el semáforo desde una distancia mayor a la distancia mínima de parada.

La intersección de estudio seleccionada es una intersección a nivel de tres ramas en forma de “Y”, compuesta por dos carriles por sentido con un ancho de 3 metros cada uno, encontrándose separados ambos sentidos con una barra de contención de concreto. En la zona de influencia de la intersección se observan señalamientos preventivos de acuerdo con las recomendaciones de SCT (2014).

Por las condiciones topográficas de la zona, existe la presencia regular de curvas horizontales; sin embargo, los conductores tienen una recta de aproximadamente 220 metros antes de llegar a la línea de parada de la intersección. Comparando la distancia de la visibilidad de parada de la Tabla 0.8 se observa que los conductores tienen una distancia suficiente para realizar un frenado adecuado si transitaran hasta una velocidad de 100 km/hr.

Tabla 0.8. Distancias de visibilidad de parada para diferentes velocidades de proyecto.

Velocidad de proyecto, en km/h	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Coeficiente de fricción longitudinal	0.3346	0.346	0.324	0.308	0.295	0.285	0.276	0.269	0.261
Distancia de reacción en m	20.83	27.78	34.72	41.67	48.61	55.56	62.5	69.44	76.39
Distancia de frenado, en m	10.24	18.21	30.36	46.05	65.39	88.48	115.39	146.16	182.85
Distancia de visibilidad de parada (DVP), en m	31.07	45.98	65.08	87.72	114	144.04	177.89	215.61	259.24
DVP para diseño, en m	40	50	70	90	120	150	180	220	260

Fuente: SCT (2016).

3.2.1.3 Condiciones topográficas

La intersección de estudio deberá presentar poca o nula presencia de curvaturas horizontales o verticales que disminuyan tanto la visibilidad de los

conductores como las velocidades de operación. Al respecto, será necesario que la intersección no cuente con pendientes importantes.

En la Figura 3.9 se puede observar el perfil de la elevación de la sección previa a la intersección seleccionada. En toda la longitud se observa un desnivel aproximado de 21 metros para una distancia de 449 metros, lo que resulta en una pendiente ponderada del 4.67%. Como en toda la longitud la pendiente es positiva no se tienen afecciones en la visibilidad del conductor y la afección de la pendiente en los vehículos es baja debido a la longitud corta antes de la intersección observada en la Figura 3.10 (346 metros).



Figura 3.9. Perfil de elevaciones en el área de la intersección semaforizada de estudio.

Fuente: Google Earth Pro (2018).



Figura 3.10. Perfil de elevación en la intersección semaforizada seleccionada.

Fuente: Google Earth Pro (2018).

3.2.1.4 Composición vehicular

Los vehículos ligeros, con clasificación tipo A de acuerdo con la norma de pesos y dimensiones (SCT, 2017), deberán representar más del 80% de la composición vehicular.

Por la ubicación de la intersección seleccionada se observa una fuerte cantidad de vehículos pesados; sin embargo, la presencia de vehículos ligeros representó más del 80% en las mediciones preliminares.

3.2.1.5 Presencia peatonal

La presencia de peatones cruzando la intersección deberá ser tal que no interfiera con las velocidades de los conductores.

Por tratarse de una carretera estatal la presencia de peatones es casi despreciable; durante las observaciones preliminares no se observaron peatones cruzando la intersección.

3.2.2 *Estudio de intersección*

Una vez seleccionada la intersección de estudio se procede a obtener las características de demanda de los usuarios.

3.2.2.1 Definición del periodo de análisis

El TRB (2010) define el periodo de estudio como el intervalo de tiempo representativo para una evaluación de las condiciones de desempeño de la vialidad y puede estar comprendido por uno o varios periodos de análisis. El periodo de análisis es el intervalo de tiempo evaluado durante una aplicación de la metodología.

Las metodologías se basan en la suposición que las condiciones del tráfico se mantienen estables durante el periodo de análisis por lo que recomienda periodos de análisis desde 0.25 a 1 h; lo anterior es debido a que para periodos de mayor duración las condiciones no permanecen estables y porque el impacto de periodos cortos los picos de demanda podrían no detectarse en la evaluación.

Debido a lo anterior se realizaron aforos con una duración de una hora dentro de semanas típicas (no vacaciones ni días festivos), solo considerándose los días de martes a jueves.

También se procuró que el periodo de análisis estuviera fuera de las horas típicas de máxima demanda, de manera que se asegure que se tengan velocidades de flujo libre, que los vehículos tengan un tiempo mínimo de seguimiento, que no se presenten colas importantes durante el intervalo rojo del ciclo y que las demoras sean mínimas.

3.2.2.2 Recolección de datos etapa 1

Para la obtención de datos en la etapa 1 se realizaron grabaciones empleando una cámara GoPro, colocando la cámara a una distancia de 90 m desde la línea de parada de la intersección semaforizada, de tal manera que pueda documentarse el comportamiento vehicular cuando los vehículos se encuentran dentro de una distancia menor a la mínima de parada si observan un cambio de fase en el semáforo. En la Figura 3.11 se observa la posición de la cámara de video.

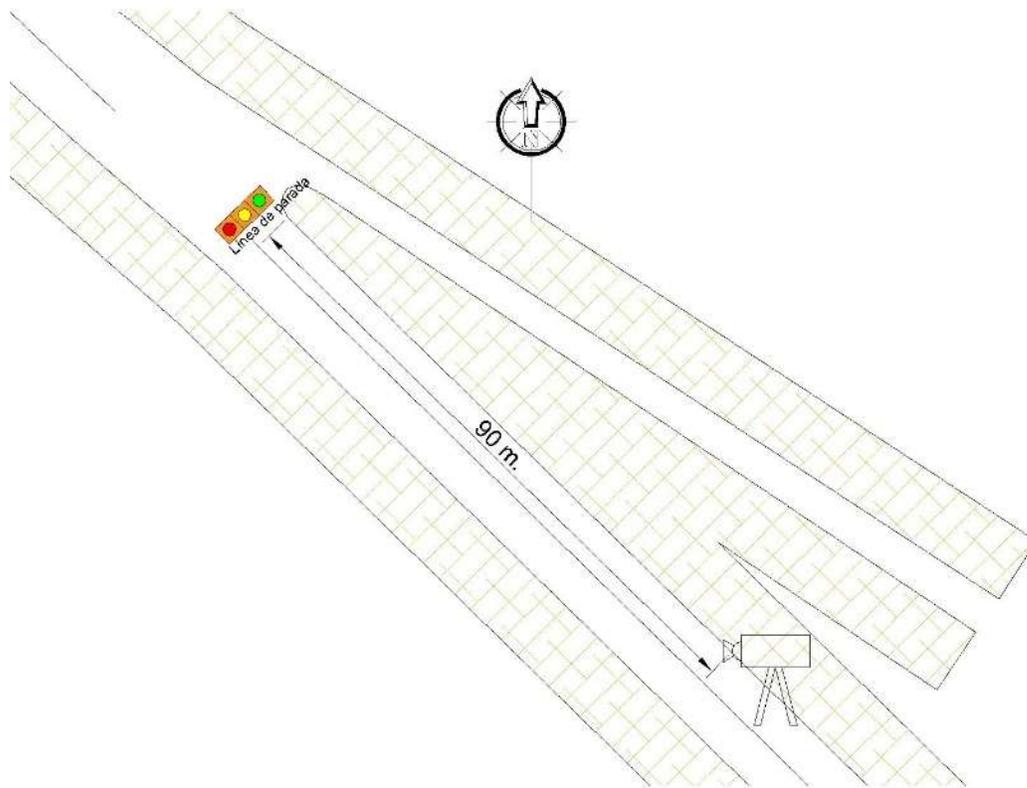


Figura 3.11. Posición de la cámara de video para grabar el comportamiento en la intersección de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron las velocidades de los vehículos a 90 m de la intersección empleando una pistola de radar Bushnell, la cual tiene una precisión de ± 2 km/hr. De acuerdo con el manual de uso de la pistola de radar es necesario realizar una

corrección por el ángulo de incidencia respecto a la entrada de los vehículos al punto deseado. Se propone un ángulo de 30 por lo que la velocidad real es aproximadamente un 88% de la mostrada en el radar (Figura 3.12).



Figura 3.12. Velocidad medida respecto del ángulo de incidencia.

Fuente: *Instruction manual Bushnell* (2012).

3.2.2.3 Determinación de variables asociadas a la intersección en la etapa 1

De acuerdo con las variables que Elmitiny *et al.* (2010) encontraron que influyen en el comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas y que se presentan en la Tabla 0.4. Variables para clasificación de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas. Tabla 0.4, se decide que las variables obtenidas durante los periodos de análisis serán las presentadas en la Tabla 0.9.

Tabla 0.9. Variables medidas en la intersección de estudio.

Variable	Valores	Descripción
Hora	HH:MM:SS	Se registra la hora de entrada de los vehículos al área observable por la cámara.
Clasificación vehicular	A, B, C	A= Automóvil, B= Autobús, C= Camión.
Velocidad medida (Km/hr)	00.00	Velocidad medida con el radar en Km/hr.
Semáforo (90 M)	V, A, R	Estado del semáforo cuando el vehículo ingresa al área observable (90 m hasta la línea de parada). V= Verde, A= Amarillo, R=Rojo.
Semáforo (Stop Line)	V, A, R	Estado del semáforo cuando el vehículo se encuentra en la línea de parada (cuando cruza la intersección) o el estado del semáforo cuando se para en la cola (intervalo de rojo). V= Verde, A= Amarillo, R=Rojo.
Aceptación de Carril	0-1	Indica si el conductor cambia de carril desde el momento que entra en el área de estudio hasta antes de llegar a la intersección. 0= No acepta, 1= Acepta el carril (no cambia de carril).
Aceptación de Aceleración	0-1	Indica si el conductor aumenta su velocidad desde el momento que entra en el área de estudio hasta antes de llegar a la intersección. 0= No acepta, 1= Acepta la aceleración (no modifica su velocidad).
F/L	0-1	Indica si el conductor es líder o seguidor en un pelotón. 0= Seguidor, 1= Líder. Si la el tiempo entre vehículos es menor de 1s se considera como seguidor.
Obstáculos/peatones	0-1	Mide la presencia de obstrucciones que pudieran modificar el comportamiento de los conductores cuando se encuentran cerca de la línea de parada. 0= Sin obstáculos, 1= Obstáculos.
Ciclos en el semáforo	N	Cantidad de ciclos de los conductores se encuentran dentro de la intersección.
YLR	0-1	Indica si los conductores presentaron comportamiento de " <i>Yellow Light Running</i> ". 0=No YLR, 1=YLR.
RLR	0-1	Indica si los conductores presentaron comportamiento de " <i>Red Light Running</i> ". 0=No RLR, 1=RLR.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.4 Modelación de datos Etapa 1

Con el empleo del entorno y lenguaje de programación de distribución libre R se realizaron modelos de regresión logística (Logit) para obtener la importancia de las variables estudiadas en la predicción de comportamientos de YLR y RLR. Fue necesario el empleo de la función *Generalized Linear Models* (glm) para la obtención de un modelo de respuesta binario, de manera que se pueda predecir si los usuarios de una red vial en la que se presentan las condiciones de velocidades a flujo libre, poca o nula presencia de peatones, con una composición vehicular particular y con

las condiciones topográficas mencionadas en la obtención de datos respetan las indicaciones del semáforo (respuesta 0), o presentan dichos conductores un comportamiento de YLR o RLR (respuesta 1).

3.2.2.5 Recolección de datos etapa 2

Para comprobar si los modelos obtenidos en la etapa 1 se procedió a realizar una segunda experimentación en la que se tuvieron dos puntos de control, el primero a 45 m desde el punto de parada en la intersección de estudio, manteniendo el segundo a una distancia de 90 m hasta la intersección, tomando datos de manera simultánea. La recolección de datos se llevó para los vehículos tipo A, siendo las variables medibles la velocidad de entrada cuando los vehículos cruzaban el primer punto de control (a 90m hasta la línea de parada), el estado del semáforo cuando cruza dicho punto, la velocidad de entrada cuando los vehículos cruzaban el segundo punto de control (a 45m hasta la línea de parada), la indicación del semáforo en ese momento dicho punto y si el vehículo es líder o seguidor (Figura 3.13).

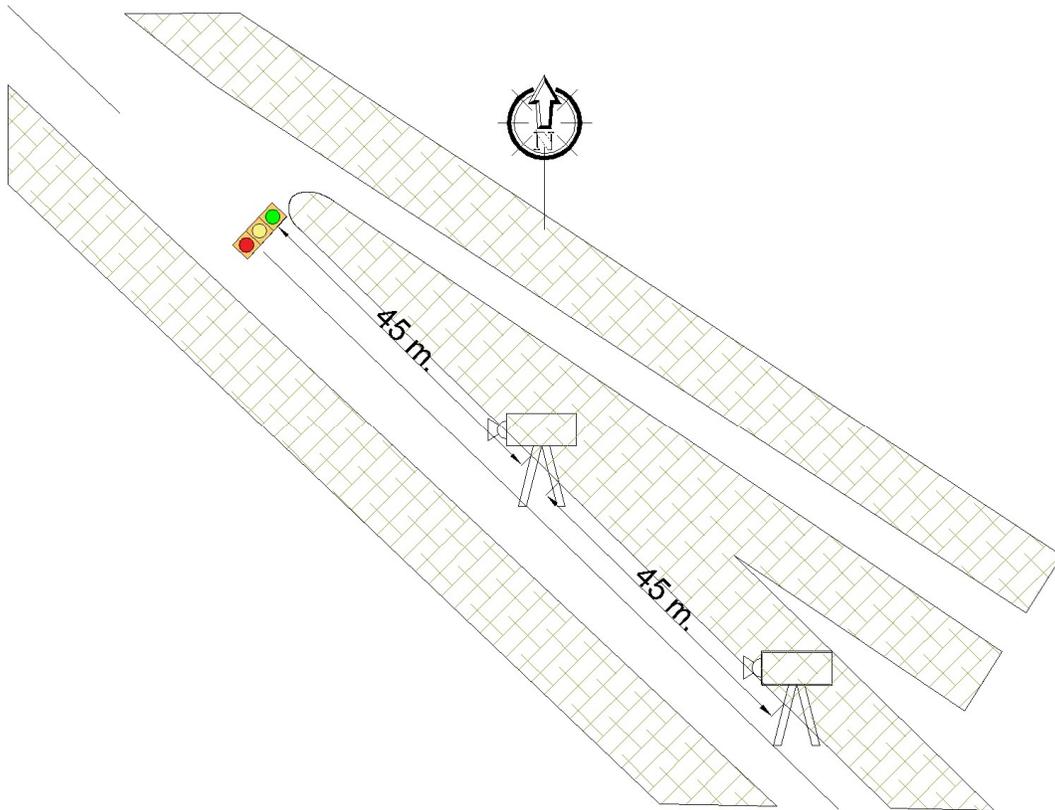


Figura 3.13. Posición de las cámaras de video para grabar el comportamiento en la intersección de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Implementación de modelo de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas en AIMSUN

Empleando una API como en la sección 3.1 se implementó el modelo que menor error presentó de los obtenidos mediante los procedimientos descritos en la sección 3.2, para obtener la cantidad de vehículos que se detienen en la intersección y que presentan las condiciones que el modelo considera que deberían cruzar la intersección. Para ello fue necesario realizar una intersección en AIMSUN con condiciones similares a las presentadas durante la obtención de los datos, posteriormente se cargaron los escenarios que incluyen tanto las condiciones de tráfico como el control del semáforo, por último, se cargó durante la simulación la

API para obtener los datos requeridos. En la Figura 3.14 se presenta el diagrama de flujo para la interacción de la API con el simulador AIMSUN, puede observarse que el modelo se activa cuando el acceso se encuentra en el intervalo verde, de lo contrario asigna un valor muy alto para la variable OY de manera que el modelo tenga como respuesta cero (0), es decir, que el vehículo no cruzará en amarillo o rojo.

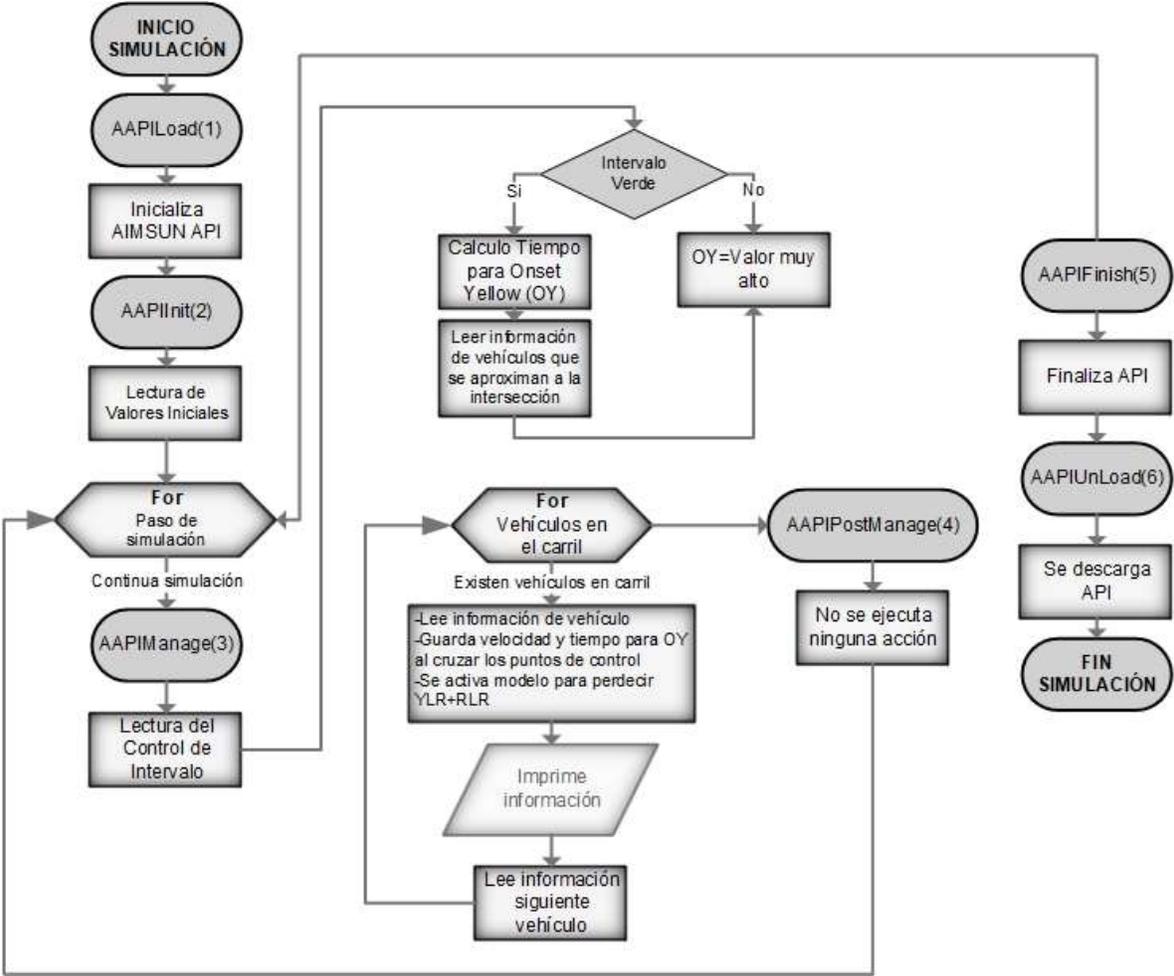


Figura 3.14. Diagrama de flujo de la interacción de la API con el simulador AIMSUN.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Intersección de estudio en AIMSUN

Se incluyó en el simulador AIMSUN una intersección semaforizada con características similares a las encontradas en la intersección de estudio, en la Figura 3.15 se observa la geometría de la sección. El plan de control de los semáforos se cargó como fijo con un ciclo de 70 segundos.

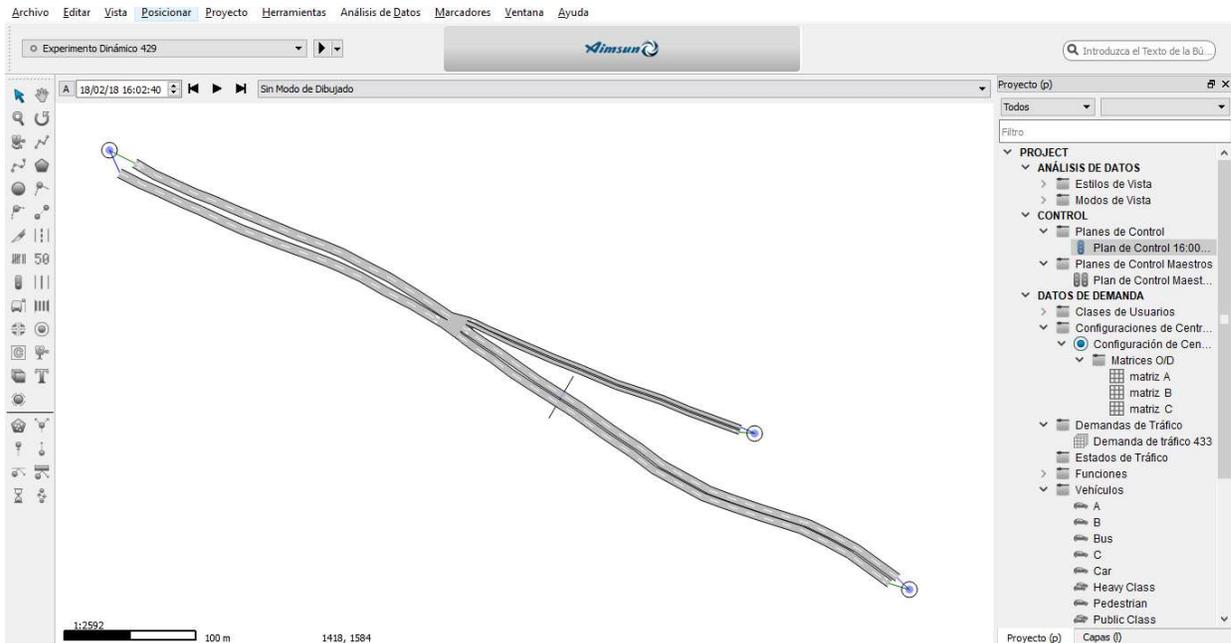


Figura 3.15. Intersección semaforizada de estudio implementada en AIMSUN.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Características vehiculares y datos de demanda

Para los datos de la demanda se incluyeron solo vehículos tipo A debido a los resultados obtenidos en la sección 3.2.2.3. En la Figura 3.16 se observan los datos de demanda y características vehiculares introducidos en el escenario de simulación. Los datos de demanda coinciden con los observados en la etapa 1 de la experimentación, mientras que las velocidades están relacionadas con las que se emplearon para obtener el modelo Logit.

Tipo de Vehículo: 374, Nombre: A

Principal Clases Características Formas 2D Formas 3D Parámetros por defecto del Experimento Combustible Emisión (QUAI)

Nombre: A ID Externo:

	Media	Desviación	Min	Máx
Longitud	4.24 m	0.45 m	2.49 m	5.15 m
Anchura	1.75 m	0.12 m	1.49 m	2.01 m
Velocidad Máxima Deseada	52 km/h	8.29 km/h	18 km/h	75 km/h
Aceleración Máxima	3 m/s ²	0 m/s ²	3 m/s ²	3 m/s ²
Desaceleración Normal	4 m/s ²	0 m/s ²	4 m/s ²	4 m/s ²
Desaceleración Máxima	6 m/s ²	0 m/s ²	6 m/s ²	6 m/s ²
Aceptación de Velocidad	1	0	1	1
Distancia Mínima entre Vehículos	1 m	0 m	1 m	1 m
Tiempo Máximo de Ceda el Paso	30 Segundos	0 Segundos	30 Segundos	30 Segundos
Aceptación de Guiado	100 %	0 %	100 %	100 %
Factor de Sensibilidad	1	0	1	1
Intervalo mínimo de tiempo entre vehículos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos	0 Segundos

Matriz O/D: 413, Nombre: matriz A

Principal Asignación de caminos Parámetros Histograma

Nombre: matriz A ID Externo:

Tipo de Vehículo: 374: A Propósito: None Contenidos: No Establecido

Cabeceras: ID: Nombre Agrupación: None Tiempo Inicial: 16:00:00 Duración: 00:00

	404	407	410	Total
404		20	20	40
407	20		20	40
410	446	20	5	471
Total	466	40	45	551

Operación: Ninguno Copiar Pegar Aceptar Cancelar

Figura 3.16. Datos de demanda de intersección de prueba.

Fuente: Elaboración propia.

4 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados recabados durante el estudio. Primero se muestran los datos obtenidos mediante las simulaciones en el *software* AIMSUN en los que se muestra el comportamiento de los vehículos simulados cuando el semáforo cambia de verde a amarillo y su posterior frenado en rojo, de manera que se delimiten las longitudes para las que el simulador permite a los vehículos no obedecer las indicaciones semaforicas. Luego se presentan los modelos de regresión logística obtenidos de los datos recabados empleando el entorno y lenguaje de programación R. Por último, se presentan los resultados de la implementación de los modelos en el AIMSUN.

4.1 Resultados del estudio de comportamiento vehicular en el simulador AIMSUN

Se presentan algunos de los datos obtenidos durante las simulaciones de prueba, para comprender de manera gráfica el comportamiento de los vehículos simulados por el programa AIMSUN cuando no respetan las indicaciones del semáforo, así como cuando deciden detenerse, de manera que se obtengan las distancias límites para estos comportamientos.

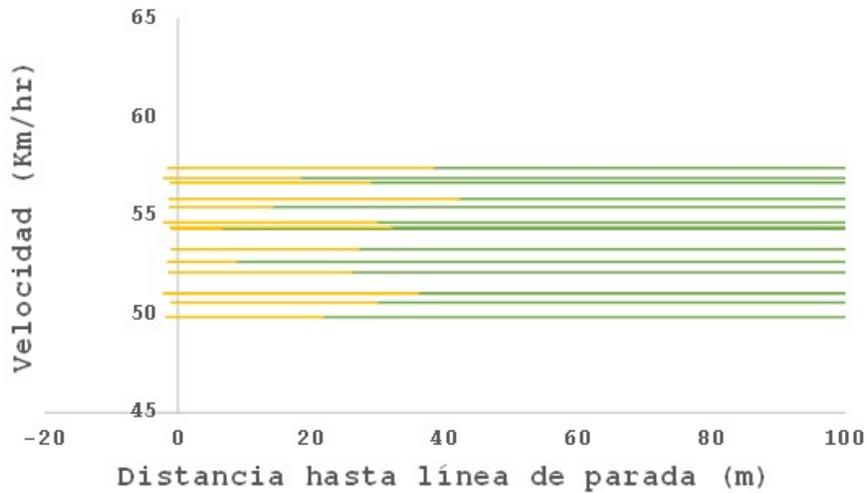
4.1.1 *Casos de Yellow Light Running y Red Light Running*

Durante cada simulación se crearon aproximadamente 500 vehículos, de los cuales se encontró que se presentaban cerca de 15 casos de YLR y 5 de RLR para un escenario promedio. De la Figura 4.1a se puede observar que en todos los casos en los que se presentaron comportamientos de YLR en una simulación típica los vehículos se encontraban a menos de 40 m hasta el punto de parada de la intersección cuando el intervalo amarillo del semáforo se activaba para el flujo que tenía el derecho de paso, la velocidad media de estos vehículos estuvo cerca de los 53 km/hr.

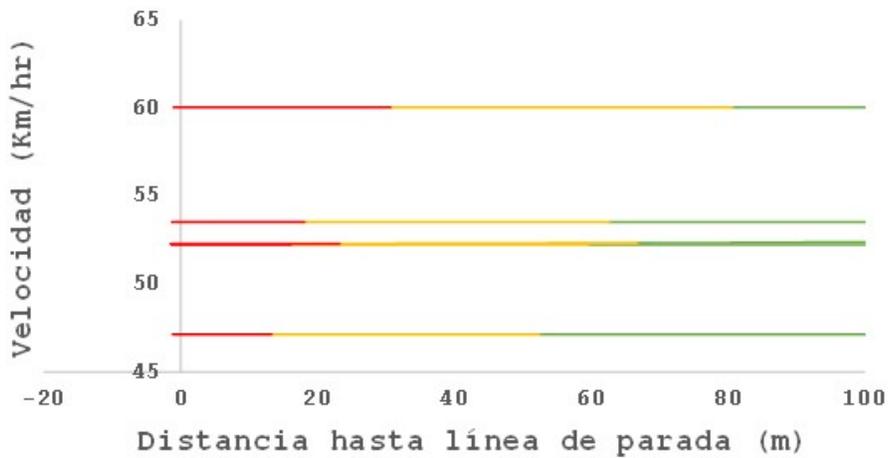
En la Figura 4.1b se presentan los casos en los que los vehículos cruzaron la intersección cuando la señal del semáforo indicaba rojo, observándose que los vehículos que se encuentran a menos de 87 m cruzan la intersección, para estos vehículos las velocidades tienen una mayor varianza. Puede observarse de la Figura 4.1 que los vehículos no modifican su velocidad una vez se ha decidido cruzar la intersección cuando el semáforo indica amarillo o rojo.

Las distancias de parada empleadas para el diseño de carreteras están relacionadas con la velocidad a la que los vehículos circulan, para velocidades de operación de 45 a 60 km/hr las distancias de parada segura se encuentran entre 55 y 87 m. Para la velocidad promedio de los vehículos que presentaron un comportamiento de YLR (53 km/hr) se requieren de aproximadamente 70 m para realizar una maniobra de parada segura, la distancia hasta la línea de parada de todos los conductores en estos casos fue menor por lo que la decisión de cruzar la intersección era adecuada.

Un comportamiento más cercano a la realidad sería que los vehículos aumentaran su velocidad cuando la distancia y la velocidad son inadecuadas para frenar, debido a que manteniendo la velocidad es probable que se encuentren en la intersección cuando otro flujo vehicular se encuentre en verde. De manera similar, las distancias hasta la línea de parada y las velocidades de los vehículos que presentaron RLR no eran adecuadas para frenar con seguridad, sin embargo, estos casos podrían presentar un mayor riesgo de colisión debido a que dos flujos vehiculares se encontrarán dentro de la intersección.



a)



b)

Figura 4.1. a) Comportamiento de vehículos que presentaron YLR, b) Comportamiento de vehículos que presentaron RLR.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Comportamientos de parada en intersección de prueba

En la Figura 4.2a se observa el comportamiento tipo de vehículos simulados cuando la distancia a la línea de parada es menor a 60 m y el semáforo realiza el cambio de intervalo de amarillo a rojo. No se aprecia un cambio en la velocidad de los vehículos hasta aproximadamente 30 m hasta la línea de parada, no importando

la diferencia de las velocidades de operación. En la Figura 4.2b se observa el mismo comportamiento para los vehículos que se encuentran en el intervalo de rojo y pueden ver el semáforo desde una distancia mayor de 50 m, es decir, no modifican su velocidad hasta encontrarse a menos de 30 m de la línea de parada o del último vehículo estacionado.

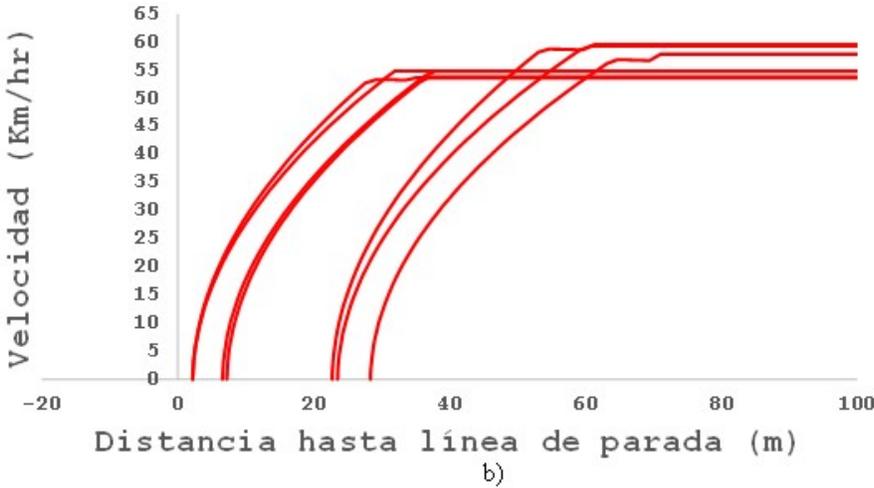
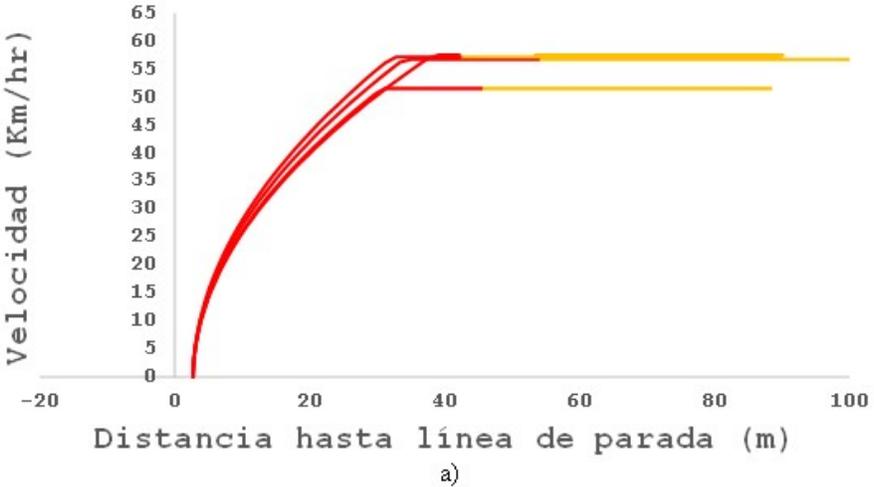


Figura 4.2. Comportamiento de frenado de vehículos cuando a) Se encuentran a corta distancia cuando el semáforo cambia a rojo, b) Pueden ver la señal roja desde una distancia mayor a 50 m.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Resultados de la obtención de modelos de comportamiento vehicular

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de campo y su empleo para la obtención de los modelos de comportamiento vehicular, comenzando con los datos de operación de la intersección de estudio, pasando por los modelos obtenidos y su comparación, y concluyendo con la implementación en el simulador AIMSUN.

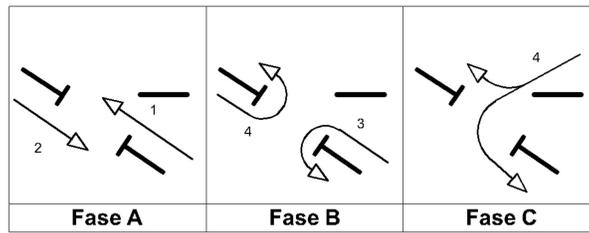
4.2.1 Datos de operación en la intersección

En la presente sección se muestran las características de operación de la intersección seleccionada como lo son las fases y los tiempos semafóricos, de tal manera que se obtengan los datos de entrada requeridos para la simulación en AIMSUN, con el objeto de poder implementar posteriormente la API y validar los resultados.

4.2.1.1 Diagramas de fases y movimientos en intersección

La intersección semaforizada elegida para el estudio cuenta con un plan de control semafórico fijo con un ciclo de 70 segundos, en la Figura 4.3 se observa el diagrama de fases y el plan de intersección, el cual cuenta con tres fases las cuales se han nombrado Fase A, Fase B y Fase C respectivamente. La configuración de fases cuenta con un total de cuatro movimientos. Cuando la Fase A inicia, los movimientos frontales de la carretera estatal Querétaro-Tequisquiapan 200. La Fase B permite las vueltas izquierdas sobre la misma carretera, mientras que la Fase C permite la incorporación vehicular a la carretera por la calle Pino Suárez. Los datos recolectados para la realización de este trabajo corresponden al movimiento 1 de la Fase A.

a) Diagrama de fases



b) Plan de intersección

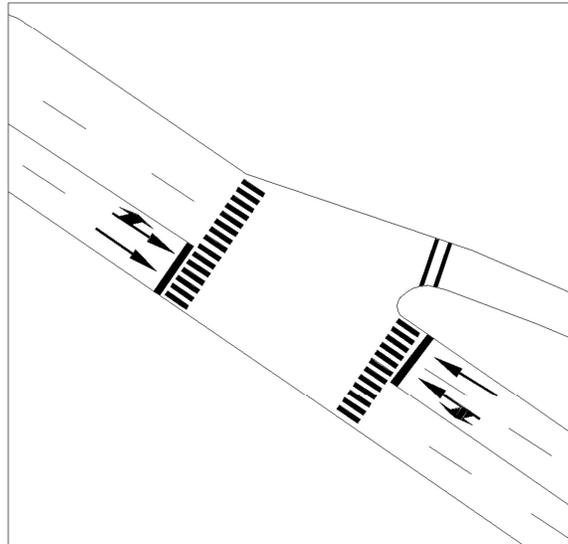


Figura 4.3. Diagrama de fases y plan en la intersección seleccionada.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.4 se presenta la distribución de los tiempos por fase para la intersección semaforizada en estudio. Las variables indicadas como una G indican la duración de la fase de verde (*Green* en inglés), las indicadas con una F representan el inicio de la fase; se considera que una fase inicia con la señal amarilla previa a la señal verde. Las variables I representan los tiempos que se encuentran entre los tiempos de verde, deben incluir los periodos de amarillo y todo rojo, como se observa en el diagrama para la intersección de estudio no se consideran periodos de todo.

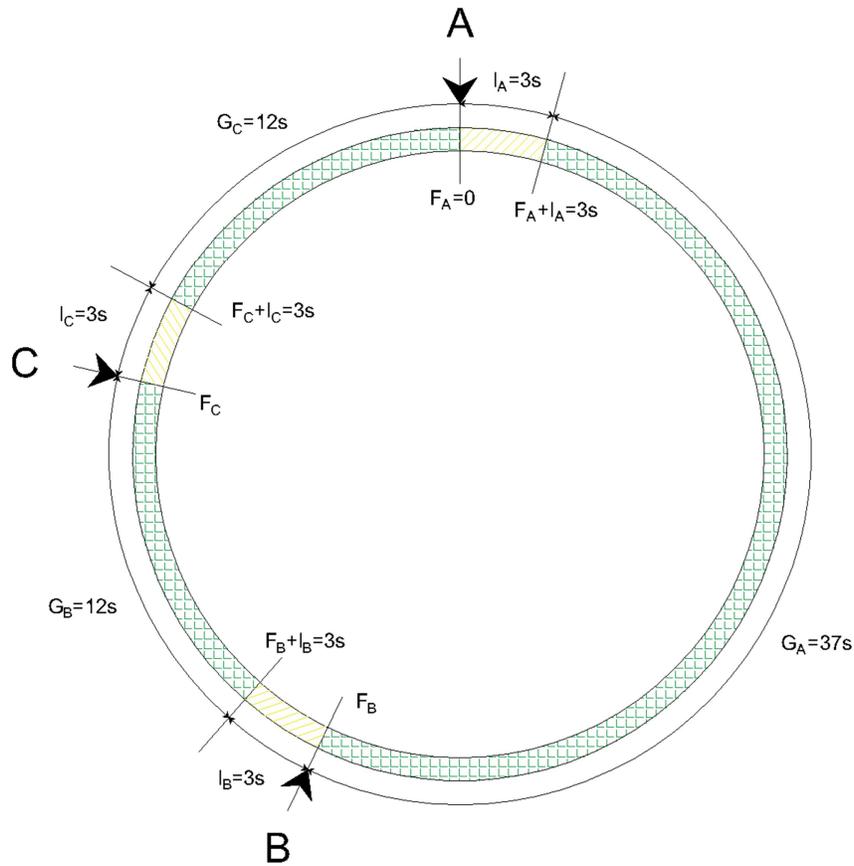


Figura 4.4. Diagrama de ciclo de señal estudiada.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Datos de comportamiento de usuarios en intersección de estudio

Se realizaron aforos de velocidad en la intersección seleccionada mediante los procedimientos indicados en la sección 3.2 los días 14, 15, 28 y 29 de marzo de 2017, en un horario comprendido entre las 16:00 y las 17:00 horas. Los resultados obtenidos se muestran en las secciones siguientes.

En la Tabla 0.10 se observan las velocidades de los vehículos cuando estos se encuentran a 90 metros de la intersección. De las cantidades totales de los vehículos se observa que el 84% de los vehículos que se presentaron en la hora de

estudio eran de tipo A; sin embargo, la presencia de vehículos tipo B y C fueron representativas con porcentajes de 6 y 10% respectivamente.

Si bien los resultados de la Tabla 0.10 se basan en velocidades puntuales nos da una idea de la manera en que se comportan los vehículos respecto de los cambios en las fases semaforicas. Las tablas para los siguientes días pueden encontrarse en la sección de anexos.

Tabla 0.10. Velocidades obtenidas en los aforos realizados el 14 de marzo de 2017 según la clasificación vehicular.

	Clasificación Vehicular		
	A	B	C
Volumen Veh Promedio	446	31	51
Velocidad Promedio (Km/hr)	54.41	45.04	45.48
Volumen Veh Fase Verde	251	18	25
Velocidad Promedio Fase Verde (Km/hr)	62.69	46.28	54.08
Volumen Veh Intervalo Amarillo	14	1	3
Velocidad Promedio Intervalo Amarillo (Km/hr)	59.29	78	65.34
Volumen Veh Intervalo Rojo	181	12	23
Velocidad Promedio Intervalo Rojo (Km/hr)	42.55	40.42	33.53

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.5 se observa el aumento de las velocidades promedio del intervalo amarillo respecto de la fase verde, comprobando que los vehículos aceleran al ver la señal amarilla en el semáforo.

Si bien los aumentos en las velocidades eran esperados, el comportamiento de los vehículos tipo B y C fueron demasiado grandes, lo que hasta este punto nos da una idea de que serán los vehículos que presentarán más casos *de Yellow Light Running* y *Red Light Running* debido a que por sus dimensiones, sus velocidades y la distancia hasta la línea de parada sería un frenado inseguro o poco cómodo.

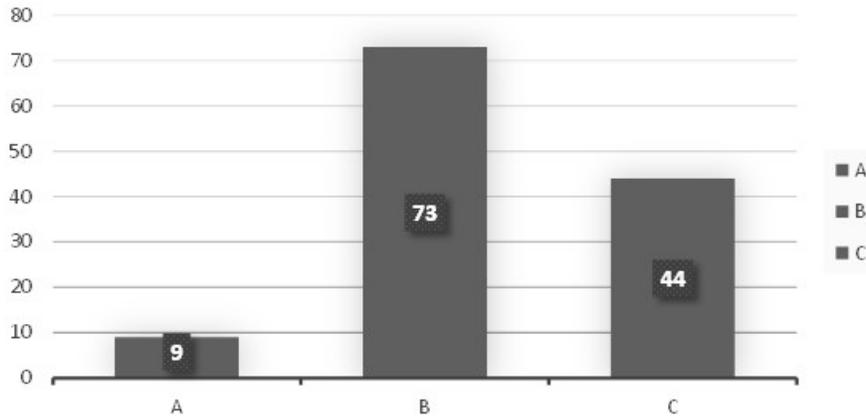


Figura 4.5. Aumento de velocidades promedio cuando el intervalo amarillo se activa según el tipo vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes de comportamiento de *Yellow Light Running* y *Red Light Running* se observan en la Figura 4.6, siendo los vehículos tipo B los que presentan mayor incidencia para cada uno de los movimientos. Lo anterior está relacionado con un aumento en las velocidades cuando los vehículos observan el fin de la fase verde.

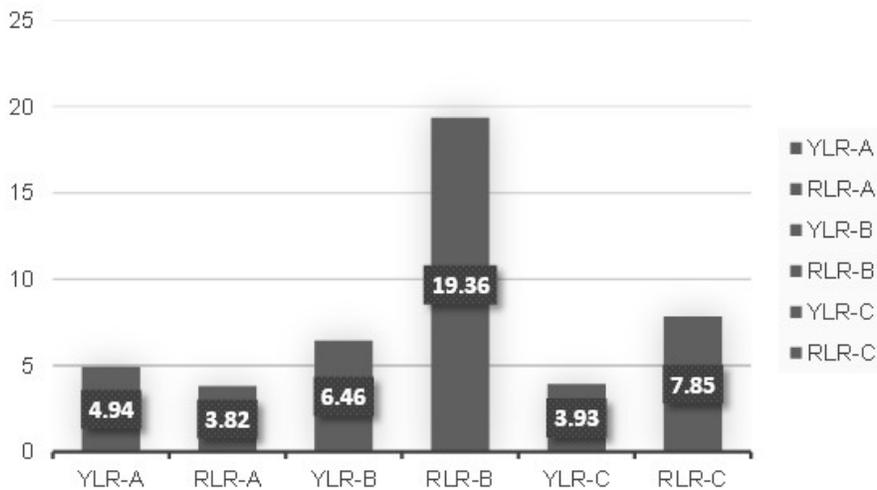


Figura 4.6. Porcentajes de *Yellow Light Running* y *Red Light Running* para cada tipo vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Modelos obtenidos en la Etapa 1

Mediante el análisis de los datos obtenidos en la etapa 1 y el empleo del *software* R se obtuvieron las variables que presentaron una mayor importancia para la respuesta binaria (YLR+RLR=1) de modelos de regresión logística (modelos Logit). En esta primera etapa se analizaron todos los vehículos que entraron en la intersección para obtener los rangos de tiempo en los que los modelos pueden predecir mejor el comportamiento vehicular.

En la Tabla 0.11 se presentan los primeros 6 modelos obtenidos empleando el análisis de los datos. Las variables que resultaron más significativas fueron la velocidad tomada a 90 m hasta la intersección de parada, el tipo de vehículo (A=0, B=1, C=2) y el tiempo para el inicio del amarillo (*Onset Yellow*).

Los primeros tres modelos (Modelo 1, Modelo 2 y Modelo 3) fueron obtenidos considerando que como cero (0) el tiempo para el inicio del amarillo para los vehículos que entraban al punto de control con intervalos amarillo o rojo (cuando la fase ha terminado). Para los últimos 3 modelos no fueron tomados datos cuando los vehículos entraban al punto de control cuando la fase había terminado.

Tabla 0.11. Modelos Logit obtenidos en la Etapa 1.

RESPUESTA	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3		
	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z
Constante	*** -8.292	0.601	-13.797	*** -8.272	0.602	-13.741	*** -8.227	0.607	-13.554
VEL 90M	*** 0.116	0.01	11.6	*** 0.116	0.01	11.6	*** 0.114	0.011	10.364
TIPO VEH	*** 0.986	0.192	5.135	*** 0.984	0.192	5.125	*** 0.993	0.195	5.092
OY CORREGIDO	*** -0.393	0.048	-8.188	*** -0.388	0.049	-7.918	*** -0.332	0.053	-6.264
ϵ clasificación	0.082			0.09			0.1		
Índice MacFadden	0.339			0.319			0.302		
RESPUESTA	Modelo 4			Modelo 5			Modelo 6		
	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z
Constante	0.157	1.274	0.123	0.157	1.273	0.123	0.108	1.274	0.085
VEL 90M	0.025	0.019	1.316	0.025	0.019	1.316	0.026	0.019	1.368
TIPO VEH	* 0.817	0.369	2.214	* 0.817	0.369	2.214	* 0.813	0.37	2.197
OY CORREGIDO	*** -0.685	0.089	-7.697	*** -0.684	0.089	-7.685	*** -0.671	0.092	-7.293
ϵ clasificación	0.089			0.116			0.173		
Índice MacFadden	0.565			0.515			0.405		

Códigos de significancia: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fuente: Elaboración propia.

Puede observarse que, exceptuando las constantes de los modelos, los signos de los coeficientes se mantienen constantes, siendo que para la velocidad a 90 m de la intersección presenta un signo positivo, lo que representa una mayor probabilidad de obtener 1 (un comportamiento de YLR+RLR) cuando la velocidad en el punto de control es mayor (90 m hasta la intersección). Para el tipo de vehículo se observa nuevamente un signo positivo, en este caso los vehículos tipo A estaban representados con un valor numérico igual a cero (0), al tipo B les corresponde el uno (1) y al tipo C el dos (2), de lo anterior se deduce que es más probable que los vehículos pesados no respeten la indicación del semáforo. Para la variable *Onset Yellow* (tiempo para el inicio del intervalo amarillo), el signo se presenta como negativo lo que indica una mayor probabilidad de obtener 1 mientras menos tiempo quede para el fin de la fase.

Mediante el empleo de gráficas de densidad condicional empleando R, se puede observar como la distribución condicional de la variable categórica (YLR+RLR) cambia dependiendo de las variables numéricas (variables independientes del modelo). En la Figura 4.7 se observan estas gráficas para el Modelo 3, la parte de las gráficas representa la probabilidad de obtener 1 (comportamiento de YLR o RLR). Con esto se representa gráficamente las aseveraciones respecto a la respuesta del modelo con las variaciones de las variables.

En la Figura 4.7 superior derecha, que representa la variación de la probabilidad de obtener como respuesta 1 (YLR+RLR), se observa que la variación de la probabilidad con respecto al tipo de vehículo no es significativa, variando de 10% aproximadamente para vehículos tipo A, hasta un 20% para vehículos tipo B y C. Debido a lo anterior y a que el porcentaje de vehículos pesados es aproximadamente un 15% de la composición vehicular se puede exceptuar el tipo de vehículo como parámetro de predicción del comportamiento vehicular, resultando el modelo de la Ecuación 4.1.

$$x = -8.25067 + 0.11472 * (\text{VEL90M}) - 0.35851 * (\text{OY})$$

Ecuación 0.4

Donde x representa la utilidad del modelo. Para obtener la probabilidad se emplea la relación representada en la Ecuación 4.2.

$$P(x) = \frac{\exp(x)}{\exp(x) + 1}$$

Ecuación 0.5

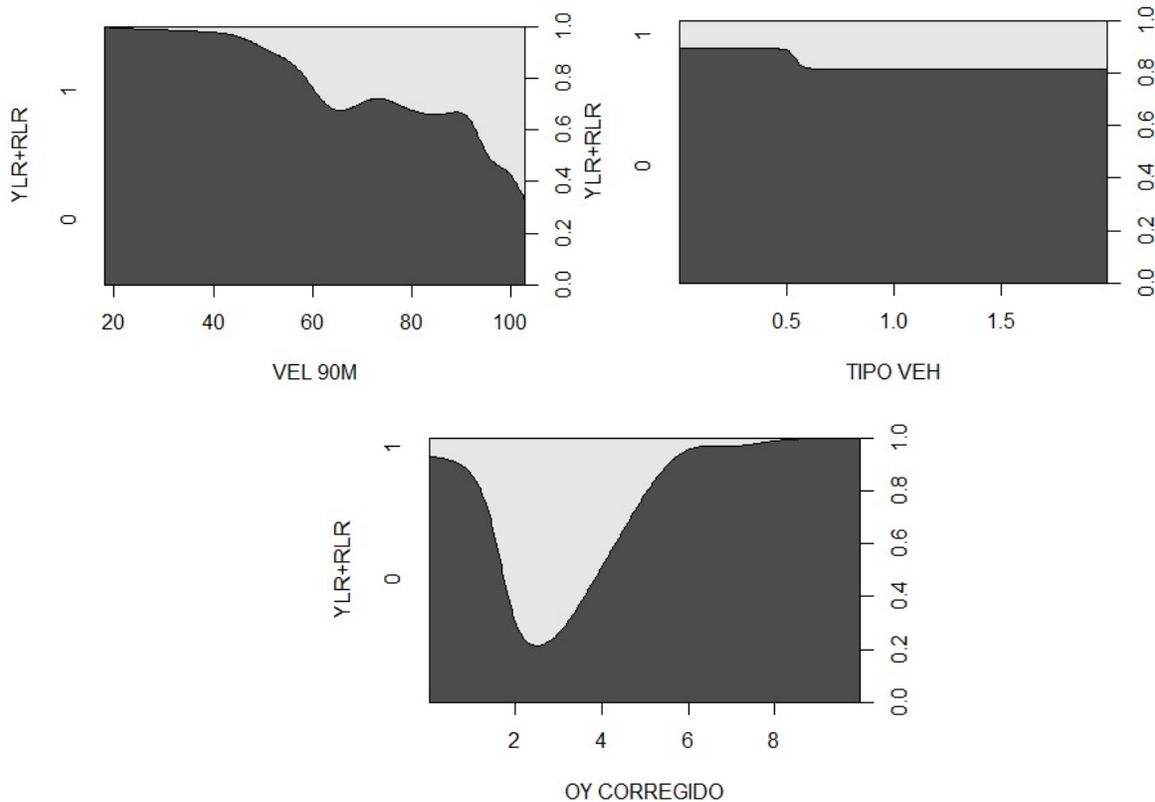


Figura 4.7 Gráficas de densidad condicional para Modelo 3.

Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo obtenido eliminando el tipo de vehículo se obtienen las gráficas de densidad condicional mostradas en la Figura 4.8. Puede observarse que son

similares a las presentadas en la Figura 4.7. Dicho modelo presenta un error de clasificación menor al 10%, y tiene un índice de McFadden de 0.3122.

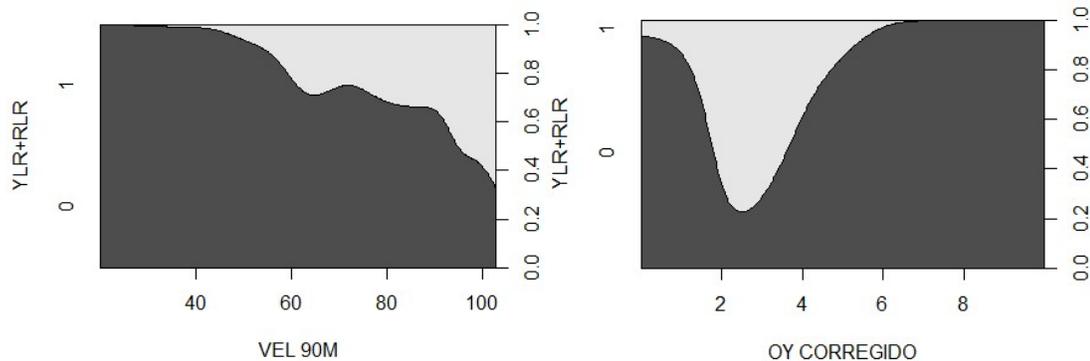


Figura 4.8 Gráficas de densidad condicional para modelo de la Ecuación 4.1.

Elaboración propia.

4.2.4 Modelos obtenidos en la Etapa 2

En esta sección se presentan los modelos Logit obtenidos del análisis de los datos recabados en la Etapa 2 de la experimentación. De igual manera que en la sección anterior dichos modelos fueron obtenidos empleando el *software* R, para obtener una respuesta binaria para el comportamiento vehicular observado, siendo la respuesta de 1 para los vehículos que no obedecen las indicaciones del semáforo (YLR+RLR) y cero para los vehículos que se detienen antes de la línea de parada cuando la fase del acceso ha terminado. Los datos obtenidos en esta parte de la experimentación se concentraron en dos puntos de control como se describió en la metodología, uno colocado a 90m hasta la línea de parada y otro colocado a 45m. Las fases y tiempos semafóricos no se modificaron.

Para esta etapa solo se analizaron los últimos 10 segundos antes de que la fase terminara, tiempo que se encontró como más representativo en los resultados de la Etapa 1 y algunos segundos posteriores hasta que los vehículos paraban en la intersección ante una indicación amarilla o roja.

En la Tabla 0.12 se presentan los modelos Logit obtenidos en la Etapa 2. Los Modelos del 7 hasta el 11, son modelos en los que los valores de OY 90M (tiempo faltante para el fin de la fase cuando el vehículo entra en el primer punto de control) y OY 45M (tiempo faltante para el fin de la fase cuando el vehículo entra en el segundo punto de control) toman valores negativos, es decir, cuando la fase ha terminado y cada unidad negativa representa el tiempo desde que la fase terminó. Los modelos con las leyendas Modelo 12, Modelo 13 y Modelo 14, fueron realizados considerando que una vez terminada la fase los valores de las variables OY 90M y OY 45M toman valores de cero (0).

Tabla 0.12. Modelos Logit obtenidos en la Etapa 2.

RESPUESTA	Modelo 7			Modelo 8			Modelo 9		
	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z
Constante	* 5.084	2.328	2.184	** 4.526	1.718	2.634	0.077	1.008	0.076
VEL 90M	*** -0.201	0.058	-3.466	*** -0.198	0.057	-3.474	-		
OY 90M	* -0.778	0.369	-2.108	*** -0.653	0.119	-5.487	*** -0.513	0.097	-5.289
VEL 45M	*** 0.173	0.045	3.844	*** 0.175	0.045	3.889	* 0.046	0.022	2.091
OY 45M	0.123	0.342	0.36	-			-		
ε clasificación	0.196			0.18			0.204		
Índice MacFadden	0.362			0.361			0.272		

RESPUESTA	Modelo 10			Modelo 11		
	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z
Constante	-			-		
VEL 90M	-			* -0.087	0.035	-2.486
OY 90M	*** -0.513	0.097	-5.289	*** -0.568	0.107	-5.308
VEL 45M	*** 0.047	0.011	4.273	*** 0.141	0.04	3.525
OY 45M	-			-		
ε clasificación	0.204			0.219		
Índice MacFadden	0.272			0.312		

RESPUESTA	Modelo 12			Modelo 13			Modelo 14		
	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z	Coef.	Std. Error	Valor Z
Constante	-1.343	2.336	-0.575	-			-		
VEL 90M	* -0.143	0.069	-2.072	*** -0.172	0.048	-3.583	*** -0.147	0.042	-3.5
OY 90M	* 0.954	0.387	2.465	* 0.848	0.339	2.501	-		
VEL 45M	*** 0.205	0.057	3.596	*** 0.211	0.056	3.768	*** 0.215	0.053	4.057
OY 45M	*** -2.278	0.537	-4.242	*** -2.145	0.479	-4.478	*** -1.19	0.226	-5.265
ε clasificación	0.11			0.11			0.11		
Índice MacFadden	0.572			0.57			0.526		

Código de significancia: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que para los modelos derivados del modelo 1 los signos de los coeficientes de la velocidad obtenida a 90 m hasta la línea de parada (punto

de control 1) son negativos, lo anterior debido a que los vehículos que cruzan cuando la fase está por terminar tienden a acelerar cuando el semáforo inicia el parpadeo de verde. Para la velocidad a 45 m hasta la línea de parada (segundo punto de control) el signo es positivo, lo que se interpreta como que mientras más alta es la velocidad en este punto mayor es la probabilidad de no obedecer la indicación del semáforo. Este mismo comportamiento ocurre en los modelos obtenidos con las variantes del modelo 2.

Los signos de las variables OY (tiempo restante para el fin de la fase cuando el vehículo se encuentra a 90m de la línea de parada) y OY_1 (tiempo restante para el fin de la fase cuando el vehículo se encuentra a 45m de la línea de parada) varían entre los modelos 1 y 2. Para los primeros la variable OY tiene signo negativo mientras que la variable OY_1 presenta un signo positivo. Para estos modelos, mientras mayor sea el tiempo para el fin de la fase cuando los vehículos se encuentran a 90m hasta la línea de parada menor es la probabilidad de cometer comportamiento de YLR o RLR, ocurriendo lo contrario con la variable OY_1, es decir, que mientras mayor sea el tiempo restante para el fin de la fase mayor es la probabilidad de obtener 1 como respuesta. Con los modelos de las variantes 2 ocurre lo contrario en ambos casos.

Los errores de clasificación presentados en los modelos 1 se encuentran cercanos a un 20%, mientras que para los modelos con las variaciones del modelo 2 los errores son de aproximadamente 10%. Debido a lo anterior se decidió emplear el Modelo 12 para las pruebas en el simulador, ya que presenta un error bajo de clasificación y un índice de McFadden mayor que los otros.

En la Figura 4.9 se presentan las gráficas de densidad condicional para el Modelo 12, se puede observar que para las variables OY y OY_1 el comportamiento es similar, para los vehículos que se entran al punto de control 1 el valor crítico se encuentra entre los 3 y 4 segundos para el fin de la fase, mientras que para los

vehículos que entran al punto de control 2 el valor crítico es cercano a los 2 segundos.

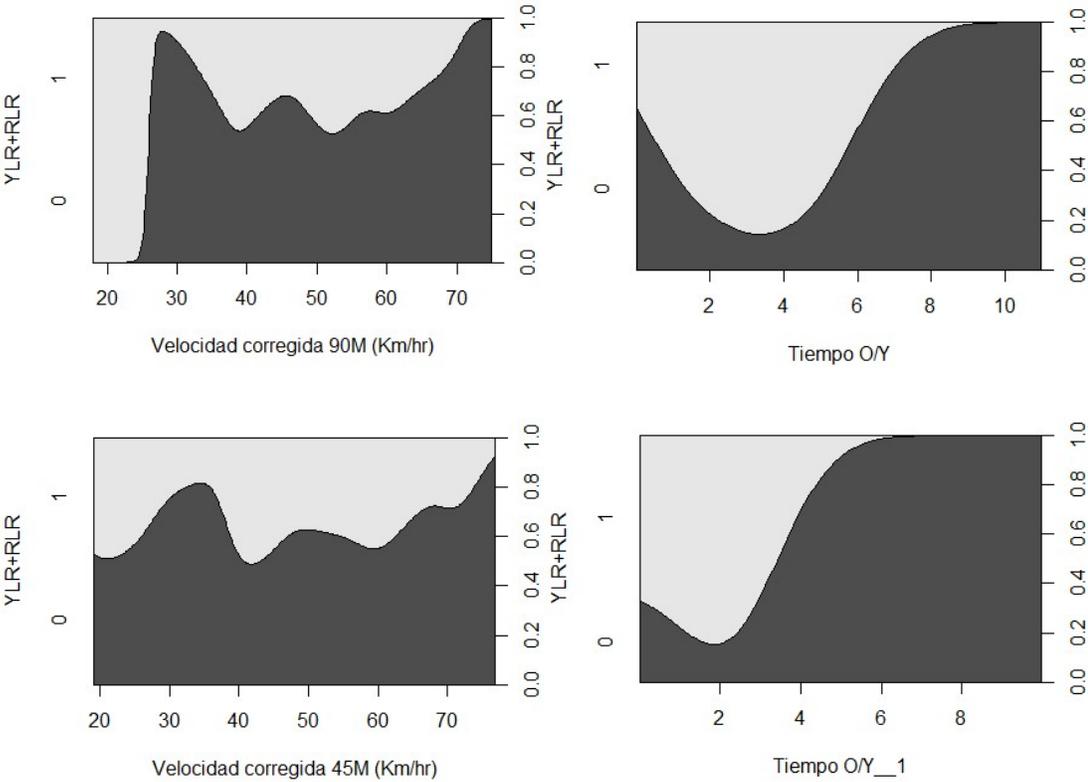


Figura 4.9. Gráficas de densidad condicional para Modelo 12.
Elaboración propia.

4.3 Resultados de la implementación del modelo en AIMSUN

El Modelo 12 fue empleado para verificar el comportamiento de los vehículos simulados en AIMSUN cuando se aproximan a una intersección semaforizada y el tiempo del intervalo verde está por concluir. La validación del escenario dinámico se realizó con las velocidades de los vehículos y con los patrones y cantidad de vehículos que entraron en la intersección en el tiempo de la simulación.

El error de clasificación del modelo con respecto a los vehículos simulados es de 12.34%. En la Tabla 0.13 se presenta la prueba t para las medias de la respuesta

del modelo Logit de los vehículos simulados en AIMSUN respecto a los datos observados en campo. Debido a que el valor P es menor que 0.05 es posible rechazar la hipótesis nula, la cual indicaría que las medias son independientes, lo cual sugiere que lo observado en campo y lo obtenido aplicando el modelo Logit en el simulador están relacionados.

Tabla 0.13. Prueba t para medias de dos muestras emparejadas.

	N	Mean	StDev	SE Mean
Observado	128	0.383	0.488	0.043
Logit Aimsun	81	0.173	0.38	0.042
Diferencia= μ (Observado) - μ (Logit Aimsun)				
Diferencia estimada	0.21			
95% CI:	(0.0909, 0.3291)			
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 3.48 P-Value = 0.001 DF = 198				

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Validación de modelo en intersección urbana

La intersección de la avenida Tecnológico y la calle Francisco I. Madero fue empleada para verificar el modelo debido a que se detectó que un gran volumen de usuarios que presentaban comportamiento de YLR o RLR; dichas vialidades se encuentran en el centro de la ciudad de Querétaro. La avenida Tecnológico cuenta con dos carriles centrales de circulación, un carril izquierdo de estacionamiento y un carril derecho para uso del transporte público y bicicleta. En la zona cercana a la intersección se observó gran presencia de peatones cruzando las vialidades en puntos que no eran los designados para estas acciones, ello provoca que inclusive cuando el volumen vehicular era bajo, las velocidades de operación de los vehículos privados no superaban los 45 km/hr (Figura 4.10).

La posición del punto de control a 90 metros hasta la línea de parada se situaba muy cercana a la intersección semaforizada anterior, por lo que la velocidad de los usuarios dependía de las indicaciones del semáforo aguas abajo.

Debido a todo lo anterior no pudo ser aplicado el modelo en dicha intersección debido a que estaba enfocado a vehículos ligeros que circulan a velocidad de deseo y para intersecciones que no presentan obstáculos laterales (peatones o ciclistas). Comportamiento de YLR y RLR fue observado pero las variables influían en el comportamiento de dichos usuarios no estaba relacionado con las variables de las que se compone el modelo.



Figura 4.10. Presencia de peatones cruzando en punto de control 2.
Elaboración propia.

5 CONCLUSIONES

A través del análisis del comportamiento de los vehículos simulados en una intersección semaforizada en el simulador AIMSUN, se observó que los vehículos mantienen velocidades constantes incluso cuando han decidido no obedecer las indicaciones de reducir la velocidad (intervalo amarillo) y de detenerse (intervalo rojo) emitidas por el semáforo. Los vehículos que el simulador genera y que deciden cruzar la línea de parada cuando la fase del acceso ha terminado, están relacionados con la distancia de parada, siendo para velocidades de entre 45 y 60 km/hr un rango entre 55 y 87 m, cuando los vehículos se encuentran a distancias mayores que las de parada el simulador les indica reducir su velocidad hasta detenerse antes de la línea de parada. Por otra parte, las distancias de frenado para los vehículos simulados parece ser una constante independiente de la velocidad de operación y de las indicaciones del semáforo, siendo esta de 30m hasta la línea o punto de parada.

A partir la investigación se obtuvo un modelo de regresión logística de respuesta binaria en el que el valor 1 se asignó a los vehículos que cruzan la intersección cuando la fase ha terminado [presentan comportamiento de *Yellow Light Running (YLR)* o *Red Light Running (RLR)*] y el valor 0 para los vehículos que se detienen antes de la línea de parada. Las variables de dicho modelo son la velocidad cuando los vehículos cruzan la línea de 90 m hasta la línea de parada, el tiempo restante en la fase en ese momento y la velocidad cuando el mismo vehículo cruza la línea de 45 m hasta la línea de parada y el tiempo restante de la fase en ese momento. De acuerdo con dicho modelo, mientras mayor sea la velocidad de los vehículos cuando cruzan la línea de 90m hasta la línea de parada menor será la probabilidad de que el vehículo cruce la intersección cuando la fase ha terminado. La velocidad cuando los vehículos cruzan la línea de 45m hasta la línea de parada también es un parámetro incluido en el modelo siendo que mientras mayor es la

velocidad en este punto mayor es la probabilidad de cruzar la intersección cuando la fase ha terminado. El error de clasificación del modelo es de 10.93%.

Con el desarrollo una Interface de Programación de Aplicaciones (API) para verificar el comportamiento vehicular simulado en AIMSUN. Se tomaron parámetros como la distancia a la que los vehículos se encuentran hasta la línea de parada, así como la velocidad a la que se acercan a la intersección para tomar la decisión de obedecer o no las indicaciones del semáforo, encontrando que de acuerdo con el modelo un 5% de vehículos simulados debieron cruzar la intersección y no lo hicieron.

Mediante la implementación del modelo obtenido en intersecciones semaforizadas con un control actuado y empleando radares de velocidad en dos puntos de control (a 90 y 45 m hasta la línea de parada) es posible disminuir el porcentaje de vehículos que cruzan la línea de parada cuando la fase del siguiente acceso ha iniciado, lo que significaría que no existirían más de dos flujos ocupando la intersección, resultando en intersecciones más seguras.

Para la realización del modelo no fueron consideradas variables relacionadas con el usuario como la edad, genero, visión, entre otros; las cuales podrían influir en el tiempo de reacción del conductor y por lo tanto con su comportamiento cuando se aproximan a las velocidades estudiadas a una intersección semaforizada con las características ya descritas.

5.1 Líneas de investigación futura

Para la realización del modelo de predicción de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas obtenido mediante el estudio se estudiaron solamente un tipo particular de intersecciones, siendo el flujo vehicular cercano o igual al flujo libre; lo anterior abre paso para líneas de investigación futura en dos rubros principales:

1. Debido a las limitantes técnicas para la recolección y análisis de los datos el estudio recabó datos de solamente una intersección con características particulares, el siguiente paso lógico sería verificar si este modelo cumple para otras intersecciones con las mismas características o de lo contrario implementar un nuevo modelo agregando una mayor cantidad de datos de entrada.
2. Incluir intersecciones semaforizadas con niveles de servicio bajos. Un modelo general de comportamiento vehicular en intersecciones semaforizadas debe incluir aquellas en las que las demoras sean lo suficientemente grandes para que los usuarios permanezcan más de un ciclo en la intersección, en este panorama entrarían tentativamente variables como el tiempo que el usuario ha permanecido en la cola antes de cruzar la intersección, lo que haría al modelo más robusto y probablemente menos eficiente.
3. Incluir en el modelo variables relacionadas con el usuario, como la edad, genero, calidad de la visión, entre otros; que pudieran estar relacionadas con el tiempo de reacción; de manera, que pueda verificarse si el tiempo de reacción de los usuarios influye en la presencia de comportamientos de YLR y RLR.

Por otra parte, México forma parte de los países que firmaron la resolución 64/255 de las Naciones Unidas, referente al Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020, el cual tiene como objetivo reducir las víctimas mortales a causa de siniestros de tránsito, es por lo tanto importante realizar un estudio que relacione las incidencias de comportamientos de YLR y RLR con este tipo de siniestros. Otros países cuentan con cifras anuales, en nuestro país no se cuenta con esta información.

REFERENCIAS

- Akçelik, R. (1998). Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis (7ma edición). Australian Road Research Board. Research Report ARR No. 123.
- Anjana, S., Anjaneyulu, M.V.L.R. (2015). Safety analysis of urban signalized intersections under mixed traffic. *Journal of safety research*, 52, 9-14
- Antoniou, C., Balakrishna, R., Koutsopoulos, H., Ben-Akiva, M. (2011). Calibration Methods for Simulation-Based Dynamic Traffic Assignment Systems. *International Journal of Modelling and Simulation*, 31(3), 227-233.
- Anya, A., Roupail, N., Frey, H., Schroeder, B. (2014). Application of AIMSUN microsimulation model to estimate emissions on signalized arterial corridors. *Transportation Research Record*, 2428, 75-86.
- Balakrishna, R., Antoniou, C., Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H., Wen, Y. (1999). Calibration of Microscopic Traffic Simulation Models: Methods and Application. *Transportation Research Board*, 21, 198-207.
- Balakrishna, R., Wen, Y., Ben-Akiva, M., Antoniou, C. (2008). Simulation-Based Framework for Transportation Network Management in Emergencies. *Transportation Research Record* 2041, 2049(9), 80-88.
- Barceló J., Casas J. (2005). Dynamic Network Simulation with AIMSUN. En: Kitamura R., Kuwahara M. (eds) *Simulation Approaches in Transportation Analysis. Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, vol 31. Springer, Boston, MA
- Barceló, J. (2010). Models, traffics models, simulation, and traffic simulation. En J. Barceló, *Fundamentals of traffic simulation*. Barcelona, España: Springer, pp. 1-62.
- Barceló, j. Condina, E., Casas, J., Ferrer, J., García, D. (2005). Microscopic traffic simulation: a tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 41, 173-203.

- Bauer, K. M., Harwood, D. W. (2000). Statistical models of at-grade intersections accidents. Addendum FHWA report-99-094. Washington D.C.: FHWA.
- Ben-Akiva, M., Gao, S., Wei, Z., Wen, Y. (2012). A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks. *Transportation Research Part C*, 24, 62-82.
- Ben-Akiva, M., Koutsopoulos, H., Toledo, T., Yang, Q., Choudhury, C., Antoniou, C., Balakrishna, R. (2010). Traffic Simulation with MITSIMLab. En J. Barceló, *Fundamentals of Traffic Simulation*. Barcelona, España: Springer, pp. 233-268.
- Bonsall, P., Liu, R., Young, W. (2005). Modelling safety-related driving behavior - impact of parameter values. *Transportation Research Part A*, 39(5), 425-444.
- Caird, J.K., Chisholm, S.L., Edwards, C.J., Creaser, J.I. (2007). The effect of yellow light onset time on older and younger drivers' perception response time (PRT) and intersection behavior. *Transportation Research Part F*, 10, 383-396.
- Casas, J., Ferrer, J., Garcia, D., Perarnau, J., Torday, A. (2010). Traffic simulation with AIMSUN. En Barceló, J., *Fundamentals of traffic simulation*. Barcelona, España: Springer, pp. 173-232.
- Cervantes Trejo, A., Barrera Muciño, H., Ruelas Valdés, D., Pérez Barba, U., Rosas Osuna, R., Ávila Juárez, A., Rojas Vargas, R. (2011). Guía de intervenciones de vigilancia y control de tránsito. México, Ciudad de México. Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes CONAPRA, Secretariado Técnico.
- Chen, X., Li, D., Ma, N., Shao, C. (2009). An Approach to Predicting User Perceptions of Signalized Intersection LOS Based on Fuzzy Neural Networks, en *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, Compendium of Papers DVD, Washington, DC, January, 11–15.

- Chen, Y., Chen, G., Wu, K. (2016). Evaluation of Performance of Bus Lanes on Urban Expressway Using Paramics Micro-simulation Model. *Procedia Engineering*, 137, 523-530.
- Chiappone, S., Giuffrè, O., Grannà, A., Mauro, R., Sferlazza, A. (2016). Traffic simulation model's calibration using speed–density relationship: An automated procedure based on genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 44, 147-155.
- Chin, H. C., Quddus, M. A. (2003). Applying the random effect negative binomial model to examine traffic accident occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 35, 253–259.
- Ciuffo, B., Lima, C. (2014). A Sensitivity-Analysis-Based Approach for the Calibration of Traffic Simulation Models. *IEEE Transactions on the Intelligent Transportation Systems*, 15(3), 1298-1309.
- Costescu, D., Raicu, S., Rosca, M., Burciu, S., Rusca, F. (2016). Using intersection conflict index in urban traffic risk evaluation. *Procedia Technology*, 22, 319-326.
- Dorado, M. (2014). Simulación de un agente enrutador de vehículos a través de un sistema basado en tiempos de viaje. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Dorado-Pineda, M., Obregón-Biosca, S. (2016). Improve traffic operations based on real-time traffic information. *Modern Traffic and Transportation Engineering Research*, 4(1), 1-10.
- Dowling, R., Skabardonis, A., Halkias, J., McHale, G., Zammit, G. (2004). Guidelines for calibration of simulation models: framework and applications. *Transportation Research Board*, 1876, 1-9.
- Elhenawy, M., Jahangiri, A., Rakha, H., El-Shawarby, I. (2015). Classification of driver stop/run behavior at the onset of a yellow indication for different vehicles and roadway surface conditions using historical behavior. *Procedia Manufacturing*, 3, 858-865.

- Elmitiny, N., Yan, X., Radwan, E., Russo, C., Nashar, D. (2010). Classification analysis of driver's stop/go decision and red-light running violation. *Accident Analysis and Prevention*, 42, 101-111.
- Fang, C. 2008. Development of an Application Programming Interface (API) in Simulation to Evaluate Real-Time Signal Control. *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructures Congress (ISSTP) ASCE*, 419-432. China.
- Fellendorf, M., Vortisch, P. (2010). Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. En Barceló, J., *Fundamentals of traffic simulation*. Barcelona, España: Springer, pp 63-94.
- Figueiredo, M., Seco, Á., Silva, A. B. (2014). Calibration of microsimulation models - The effect of calibration parameters errors in the models' performance. *Transportation Research Procedia*, 3, 962–971.
- Flötteröd, G., Liu, R. (2014). Disaggregate Pat Flow Estimation in an Iterated Dynamic Traffic Assignment Microsimulation. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 18(2), 204-2014.
- Galatioto, F. Giuffrè, T. Bell, M. Tesoriere, G. Campisi, T. (2012). Traffic microsimulation model to predict variability of red-light running influenced by traffic light operations in urban area. *Procedia - Social and behavioral sciences*, 53, 872-880.
- Garrido, R., Bastos, A., De Almeida, A., Elvas, J. P. (2014). Prediction of road accident severity using the ordered probit model. *Transportation Research Procedia*, 3, 214–223.
- Ghanipoor, S., Montasir, A. (2015). Safety surrogate histograms (SSH): A novel real-time safety assessment of dilemma zone related conflicts at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 96, 361-370.
- Gipps, P. (1980). A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Board*, 105-111.
- Gipps, P. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Board*, 403-414.

- González-Fernández, H., Zamora-Martí, M., Duharte-González, A. (2008). Análisis de la circulación en la intersección carretera central-avenida de Las Ámericas. *Ciencia en su PC*, 2, 94-103.
- Islam, M., Wyman, A., Hurwitz, D. (2017). Safer driver responses at intersections with green signals countdown timers. *Transportation Research Part F*, 51, 1-13.
- Jolovic, D., Stevanovic, A., Sajjadi, S., Martin, P. (2016). Assessment of Level-Of-Service for Freeway Segments Using HMC and Microsimulations Methods. *Transportation Research Procedia*, 403-416.
- Jou, R.C., Chen, Y.W. (2013). Drivers' acceptance of delay time at different levels of service at signalized intersections. *Transportation Research Part A*, 58, 54-66.
- Jou, R.C., Kou, C.C., Chen, Y.W. (2013). Drivers' perception of LOSs at signalized intersections. *Transportation Research Part A*, 54, 141–154.
- Kumara, S. S. P., Chin, H. C. (2003). Modeling accident occurrence at signalized tee intersections with special emphasis on excess zeros. *Traffic Injury Prevention*, 4(1), 53–57.
- Li, X., Sun, J.-Q. (2016). Effects of vehicle-pedestrian interaction and speed limit on traffic performance of intersections. *Physica A*, 460, 335-347.
- Liu, R. (2010). Traffic Simulation with DRACULA. En Barceló, J., *Fundamentals of Traffic Simulation*. Barceló, España: Springer, pp. 295-322.
- Liu, R., Van Vliet, D., Watling, D. (2005). DRACULA: a microscopic, day-to-day dynamics framework for modelling traffic networks. *Transportation Research A*.
- Lu, G., Wang, Y., Wu, X., Liu, H. (2015). Analysis of yellow-light running at signalized intersections using high-resolution traffic data. *Transportation Research Part A*, 73, 39-52.

- Madi, M. Y. (2016). Investigating and Calibrating the Dynamics of Vehicles in Traffic Micro-simulations Models. *Transportation Research Procedia*, 14, 1782–1791.
- May, A. (1990). *Traffic flow fundamentals*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- McFadden, D. (1973). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In Zarembka, P., *Frontiers in Econometrics*. Academic Pr, pp 105-142.
- Memon, A., Meng, M., Lam, S. (2016). Calibration of a rule-based intelligent network simulation model. *Journal of Modern Transportation*, 24, 48-61.
- Mhirech, A., Alaoui-lismaili, A. (2015). The effect of traffic light on accident probability in open and periodic boundaries system. *Physica A*, 434, 226-231.
- Muniruzzaman, S., Hadiuzzaman, Rahman, M., Hasnat, M., Haque, N., Rahman, F., Hasan, T. (2016). Calibration and validation of microscopic simulation model for non-lane based heterogeneous traffic stream of developing country. *Journal of Built Environment, Technology and Engineering*, 1, 244-251.
- Näätänen, R., Summala, H. (1982). Progress of technology and traffic accidents. *Journal of occupational accidents*, 4, 145-156.
- Ntousakis, I., Nikilos, I., Papageorgiou, M. 2015. On Microscopic Modelling of Adaptive Cruise Control Systems. *Transportation Research Procedia*, 6 (2015), 111–127.
- Obregón-Biosca, S., Romero-Navarrete, J., Mendoza-Sanchez, J., Betanzo-Quezada, E. (2016). Impact of mobility induced by urban sprawl: Case study of the Querétaro Metropolitan Area. *Journal of Urban Planning and Development*, 142 (2), 223-235.
- Palat, B., Delhomme, P. (2016). A simulator study of factors influencing drivers' behavior at traffic lights. *Transportation Research Part F*, 37, 107-118.

- Papaioannou, P. (2007). Driver behavior, dilemma zone and safety effects at urban signalized intersections in Greece. *Accident Analysis and Prevention*, 39, 147-158.
- Prusty, S., Phadnis, R. (2014). The calibration of vehicle and pedestrian flow in Mangalore city using PARAMICS. *Urban Transport XX. WIT Transactions on The Built Environment*, 138, 293-304.
- Ramírez, E. (2012). Comparación de la interacción vehicular inducida por el empleo de carriles preferenciales para el transporte público utilizando microsimulación de tráfico. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro.
- Ratrou, N., Rahman, S., Reza, I. (2015). Calibration of PARAMICS Model: Application of Artificial Intelligence-Based Approach. *Arab j. Science Engineering*, 3459-3468.
- Rauh, E., Castelan, R., Kraus, W. (2016). Intersection control for automated vehicles with MILP. *IFAC-PapersOnLine*, 49(3), 037–042.
- Reyes, C.M., Cárdenas, J. (1994). *Ingeniería de Transito Fundamentos y aplicaciones* (7ma edición). México: Alfaomega.
- Reza, I., Ratrou, N., Masiur, S. (2016). Calibration protocol for PARAMICS microscopic traffic simulation model: application of neuro-fuzzy approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43, 361-368.
- Sajjadi, S., Kondyli, A. (2017). Macroscopic and microscopic analyses of managed lanes on freeway facilities in South Florida. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 4, 61-70.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2013). *Manual de proyecto geométrico de carreteras*.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2014). *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad*.

- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (2017). PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.
- Shahzad Chaudhry, M., Ranjitkar, P. (2009). Capacity Analysis of Signalized Intersection using Microsimulation. Auckland, New Zealand: 32nd Australasian Transport Research Forum: the growth engine: interconnecting transport performance, the economy and the environment. Auckland, New Zealand.
- Shesterov, E. y Mikhailon, A. (2016). Accident rates at signalized intersections. *Transportation Research Procedia*. 20, 613-617.
- Silva, E. (2009). Mortalidad por accidentes automovilísticos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México al final del siglo XX. *Papeles de población*, 15(62) 143-172.
- Strömberg, P., Olstam, J., Tapani, A. (2015). A model for traffic simulation of flared rural road intersections. *Transportation Research Procedia*, 6, 239-258.
- Summala, H. (1996). Accident risk and driver behavior. *Safety Science*, 22, 103-117.
- Sykes, P. (2010). Traffic Simulation with Paramics. En Barceló, J., *Fundamentals of Traffic Simulation*. Barcelona, España: Springer, pp. 131-172.
- Tay, R., Rifaat, S.M. (2007). Factors contributing to the severity of intersection crashes. *Journal of Advanced Transportation*, 41(3), 245–265.
- Toledo, T., Koutsopoulos, H., Ben-Akiva, M., Jha, M. (2005). Microscopic Traffic Simulation: Models and Application. En R. Kitamura, M. Kuwahara, *Simulation Approaches in Transportation Analysis*. Springer SU, pp. 99-130.
- Transport Simulation Systems, (2013). *Microsimulator API Manual*, 178 p.

- Transport Simulation Systems. (2011). Aimsun User's Manual v7.0. 348p.
- Transportations Research Board (2010). Highway Capacity Manual.
- Vásquez-Sánchez, C., Obregón-Biosca, S. (2017). Effect of Humps in Traffic Flow. TRB 97th annual meeting, Advanced Registration Rates. Washington, D.C.
- Vilarinho, C., Soares, G., Macebo, J., Tavares, J, Sossetti, R. (2014). Capability-Enhanced AIMSUN with Real-Time Signal Timing Control. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 111, 262–271.
- Vilarinho, C., Tavares, P. (2014). Real-time traffic signal settings at an isolated signal control intersection *Transportation Research Procedia*, 3, 1021 – 1030.
- Vilarinho, C., Soares, G., Macedo, J., Tavares, J. P., Rossetti, R. J. F. (2014). Capability-enhanced AIMSUN with Real-time Signal Timing Control. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 111, 262–271.
- Villegas, J., Alhajyaseen, W., Nakamura, H., Goto, A. (2017). Performance evaluation of the inside intersection median-turn lane markings on the mobility and safety performance of signalized intersections in the Philippines and Japan. *International Association of Traffic and Safety Science Research*, 109, 545-552.
- Vogt, A. (1999). Crash models for rural intersections: four-lane by two-lane stop controlled and two-lane signalized. Federal Highway Authority (FHWA), reporte 99-128. Washington D.C.: FHWA.
- Wang, X., You, S., Wang, L. (2017). Classifying road network patterns using multinomial logit model. *Journal of Transport Geography*, 58, 104-112.
- Wu, Z., Yang, J., Huang, L. (2013). Study on the collision avoidance strategy at unsignalized intersection based on PreScan simulation. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 96, 1315-1321.

- Yan, F., Li, B., Zhang, W., Hu, G. (2016). Red-light running rates at five intersections by road user in Changsha, China: An observational study. *Accident Analysis Prevention*, 95, 381-386.
- Yan, X., Radwan, E., Abdel-Aty, M. (2005). Characteristics of rear-end accidents at signalized intersections using multiple logistic regression model. *Accident Analysis and Prevention*, 37, 983–995.
- Yang, W., Zhang, L., He, Z., Rao, Q. (2013). Paramics-based microscopic simulation evaluation for urban traffic signal two-stage controller. *International Conference on Transportation Engineering of American Society of Civil Engineers*, reporte 14-21, Chengdu, China.
- Yazan, M. (2016). Investigating and calibrating the dynamics of vehicles in traffic micro-simulations models. *Transportation Research Procedia*, 14, 1782-1791.
- Zhou, J., Cheng, L., Zhou, L., Chu, Z. (2013). Traffic incident prediction on intersections based on HMM. *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 13(6), 52-59.

APENDICE

1 ABREVIATURAS

API	<i>Application Programming Interface</i> (Interfaz de Programación de Aplicación)
ATVM	Accidentes de Tránsito de Vehículo Motor
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
SCT	Secretaría de Comunicaciones y Transportes
TRB	<i>Transportation Research Board</i>
TSS	<i>Transport Simulation Systems</i>
YLR	<i>Yellow Light Running</i> (Pasar la luz amarilla)
RLR	<i>Red Light Running</i> (Pasar la luz roja)

2 Código fuente para leer datos de la intersección semaforizada de prueba

```
//AIMSUN API Etapa 3.1,Obtención de información del comportamiento vehicular en intersección
semaforizada de prueba.
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include "ANGConProxie.h"
#include "AAPI.h"
#include <stdio.h>
#include <cstdlib>
#include <iostream>
#include <math.h> //PARA RESIDUO

char astring[128], semaforo1[10], semaforo2[10], semaforo3[10];
int tiempo, residuo, semaforo4;
double nuevavel;
int y=1;
static int vehRLR[10000];

int AAPILoad()
{
    tiempo=0;
    return 0;
}
int AAPIInit()
{
    return 0;
}

int AAPIManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double acycle)
{
    //Semáforo 0=Rojo; 1=Verde; 2=Amarillo
    //INICIA CONTROL DE SEMAFORO NORTE SEMÁFORO 1
    residuo= tiempo%1440;
    if (residuo <430)
        semaforo1,"Verde"; //verde
    else
        if (residuo<460)
            semaforo1,"Amarillo";//Amarillo
        else
```

```

        semaforo1,"Rojo";//Rojo
//INICIA CONTROL DE SEMAFORO OESTE SEMÁFORO 2
if (residuo <410)
    semaforo2,"Rojo";//Rojo
else
    if (residuo<740)
        semaforo2,"Verde";//Verde
    else
        if (residuo<770)
            semaforo2,"Amarillo";//Amarillo,
        else
            semaforo2,"Rojo";//Rojo
//INICIA CONTROL DE SEMAFORO ESTE SEMÁFORO 3
if (residuo <720)
    semaforo3,"Rojo";//Rojo
else
    if (residuo<1050)
        semaforo3,"Verde";//Verde
    else
        if (residuo<1080)
            semaforo3,"Amarillo";//Amarillo
        else
            semaforo3,"Rojo";//Rojo
//INICIA CONTROL DE SEMAFORO SUR SEMÁFORO 4
//Semáforo 0=Rojo; 1=Verde; 2=Amarillo
if (residuo <320)
    semaforo4=0;//ROJO
else
    if (residuo<690)
        semaforo4=1;//VERDE
    else
        if (residuo<720)
            semaforo4=2;//AMARILLO
        else
            semaforo4=0;//ROJO

//Se termina de controlar las variables relacionadas con el estado del semáforo
//Se lee la información de los vehículos en las secciones
InfVeh infVeh;
int nba = AKIInfNetNbSectionsANG();
for(int i=0; i<nba;i++)
{
    int id = AKIInfNetGetSectionANGId(i);
    int nb = AKIVehStateGetNbVehiclesSection(id,true);

```

```

for (int j=0; j<nb;j++)
{
    if ( id==669)
    {
        infVeh = AKIVehStateGetVehicleInfSection(id,j);
        if ((infVeh.distance2End>85) && (residuo==690))
        {
            vehRLR[y]=infVeh.idVeh;
            y++;
        }
        for(int x=1;x<=y;x++)
        {
            if (infVeh.idVeh==vehRLR[x])
            {
                if (residuo <321)
                {
                    sprintf(astring,"Vehiculo %d , Sección
%d , Carril %d, DistParada %f, Velocidad %f, Semáforo Rojo, Tiempo %d, Residuo
%d\n",infVeh.idVeh, infVeh.idSection, infVeh.numberLane, infVeh.distance2End,
infVeh.CurrentSpeed, tiempo, residuo);

                    AKIPrintString(astring);
                }
                else
                if(residuo <691)
                {
                    sprintf(astring,"Vehiculo %d ,
Sección %d , Carril %d, DistParada %f, Velocidad %f, Semáforo Verde, Tiempo %d, Residuo
%d\n",infVeh.idVeh, infVeh.idSection, infVeh.numberLane, infVeh.distance2End,
infVeh.CurrentSpeed, tiempo, residuo);

                    AKIPrintString(astring);
                }
                else
                if (residuo <721)
                {
                    sprintf(astring,"Vehiculo
%d , Sección %d , Carril %d, DistParada %f, Velocidad %f, Semáforo Amarillo, Tiempo %d,
Residuo %d\n",infVeh.idVeh, infVeh.idSection, infVeh.numberLane, infVeh.distance2End,
infVeh.CurrentSpeed, tiempo, residuo);

                    AKIPrintString(astring);
                }
                else
                if (residuo <1440)
                {

```

```

        sprintf(astring,"Vehiculo %d , Sección %d , Carril %d, DistParada %f, Velocidad %f,
Semáforo Rojo, Tiempo %d, Residuo %d\n",infVeh.idVeh, infVeh.idSection, infVeh.numberLane,
infVeh.distance2End, infVeh.CurrentSpeed, tiempo, residuo);

        AKIPrintString(astring);

    }

}

}

}

tiempo++;
return 0;
}
int AAPIPostManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double acycle)
{
    return 0;
}
int AAPIFinish()
{
    return 0;
}
int AAPIUnLoad()
{
    return 0;
}

```

3 Código fuente para leer datos para comparación con modelo Logit Etapa 2

```

//AIMSUN API TESIS Etapa 2, i. Obtención de información del
comportamiento vehicular en intersección de estudio
#include "AKIProxie.h"
#include "CIProxie.h"
#include "ANGConProxie.h"
#include "AAPI.h"
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <cstdlib>

```

```

#include <iostream>
#include <math.h>

char astring[128];
int tiempo, residuo;
double nuevavel, DIST2int[10000],tiempol;
int TTY, contaRLR, TIPOveh[10000]; //TTY= Time To Yellow
static int vehRLR[10000], IDveh[10000];
double mod1[10000],VELveh[10000], VELveh90[10000], VELveh45[10000],
TTY90[10000], TTY45[10000];
double mod2[10000], a, b, c, d, e, f;
bool DIST90[10000], DIST45[10000];

int AAPILoad()
{
    tiempo=0;
    contaRLR=0;
    for (int i=1;i<=10000;i++)
    {
        DIST90[i]=false;
        DIST45[i]=false;
    }
    return 0;
}

int AAPIIinit()
{
    return 0;
}

int AAPIManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double
acycle)
{
    residuo= tiempo%700;//700 es el ciclo del control semafórico
    //Control de tiempo de verde en sección 333 (Sección de estudio)
}

```

```

    if (residuo <370)
        TTY = 37-(residuo/10); //La variable TTY solo depende del
tiempo de verde
    else
        TTY=10000; //Si no está en verde, la variable TTY es muy
grande para evitar que se active el MOD2
        //sprintf(astring,"Timpo simulación %f, tiempo %d , residuo %d, TTY
%d\n",time, tiempo, residuo, TTY);
        //AKIPrintString(astring);
        InfVeh infVeh;
        int nb = AKIVehStateGetNbVehiclesSection(333,true);//como solo
estamos controlando una vialidad, no es necesario poner doble ciclo for
        for (int j=0; j<nb;j++)
        {
            infVeh = AKIVehStateGetVehicleInfSection(333,j);
            IDveh[j]=infVeh.idVeh;
            DIST2int[IDveh[j]]=infVeh.distance2End;
            VELveh[IDveh[j]]=infVeh.CurrentSpeed;
            if (DIST2int[IDveh[j]]<90 && DIST90[IDveh[j]]==false
&&TTY<=10)
            {
                DIST90[IDveh[j]]=true;
                infVeh = AKIVehStateGetVehicleInfSection(333,j);

                VELveh90[IDveh[j]]=infVeh.CurrentSpeed;
                a=VELveh90[IDveh[j]];
                TTY90[IDveh[j]]=TTY;
                b=TTY90[IDveh[j]];
            }
            if (DIST2int[IDveh[j]]<45 && DIST45[IDveh[j]]==false
&&TTY<=10)
            {
                DIST45[IDveh[j]]=true;
                infVeh = AKIVehStateGetVehicleInfSection(333,j);

```

```

        VELveh45[IDveh[j]]=infVeh.CurrentSpeed;
        c=VELveh45[IDveh[j]];
        TTY45[IDveh[j]]=TTY;
        d=TTY45[IDveh[j]];
        e= -1.34239-0.14221*a+0.95371*b+0.20419*c-2.27787*d;
        f= exp (e)/(exp(e)+1);
        sprintf(astring," Vehiculo %d , Utilidad %f , Prob %f ,
Vel90 %f , Vel45 %f , TTY90 %f , TTY45 %f , tiempoSTA %f \n", IDveh[j] ,
e , f , VELveh90[IDveh[j]] , VELveh45[IDveh[j]] , TTY90[IDveh[j]] ,
TTY45[IDveh[j]] , time );
        AKIPrintString(astring);
    }
    if (DIST2int[IDveh[j]]<45 && DIST90[IDveh[j]]==true
&&DIST45[IDveh[j]]==true && VELveh[IDveh[j]]<=5.0)
    {
        sprintf(astring,"Vehiculo %d ,distance2End %f , vel %f
\n", IDveh[j] , DIST2int[IDveh[j]] , VELveh[IDveh[j]]) ;
        AKIPrintString(astring);
    }

}

tiempo++;
return 0;
}

int AAPIPostManage(double time, double timeSta, double timeTrans, double
acycle)
{
    return 0;
}

int AAPIFinish()
{
    return 0;
}

int AAPIUnLoad()
{

```

```

return 0;
}

```

4 Tablas de velocidades obtenidas en los aforos etapa 1

Tabla Anexo 1. Velocidades obtenidas en los aforos realizados el 15 de marzo de 2017 según la clasificación vehicular.

	Clasificación Vehicular		
	A	B	C
Volumen Veh Totales	447	29	57
Velocidad Promedio (Km/hr)	51.41	48.49	46.92
Volumen Veh Fase Verde	229	17	28
Velocidad Promedio Fase Verde (Km/hr)	61.44	53.65	54.25
Volumen Veh Intervalo Amarillo	19	1	4
Velocidad Promedio Intervalo Amarillo (Km/hr)	51.79	49	47
Volumen Veh Intervalo Rojo	199	11	25
Velocidad Promedio Intervalo Rojo (Km/hr)	39.82	40.46	38.68

Fuente: Elaboración propia.

Tabla Anexo 2. Velocidades obtenidas en los aforos realizados el 28 de marzo de 2017 según la clasificación vehicular.

	Clasificación Vehicular		
	A	B	C
Volumen Veh Totales	446	42	29
Velocidad Promedio (Km/hr)	56.35	55.2	42.56
Volumen Veh Fase Verde	270	29	16
Velocidad Promedio Fase Verde (Km/hr)	64.32	62.11	53.19
Volumen Veh Intervalo Amarillo	8	1	1
Velocidad Promedio Intervalo Amarillo (Km/hr)	64	60	65
Volumen Veh Intervalo Rojo	168	12	12
Velocidad Promedio Intervalo Rojo (Km/hr)	43.17	38.09	26.5

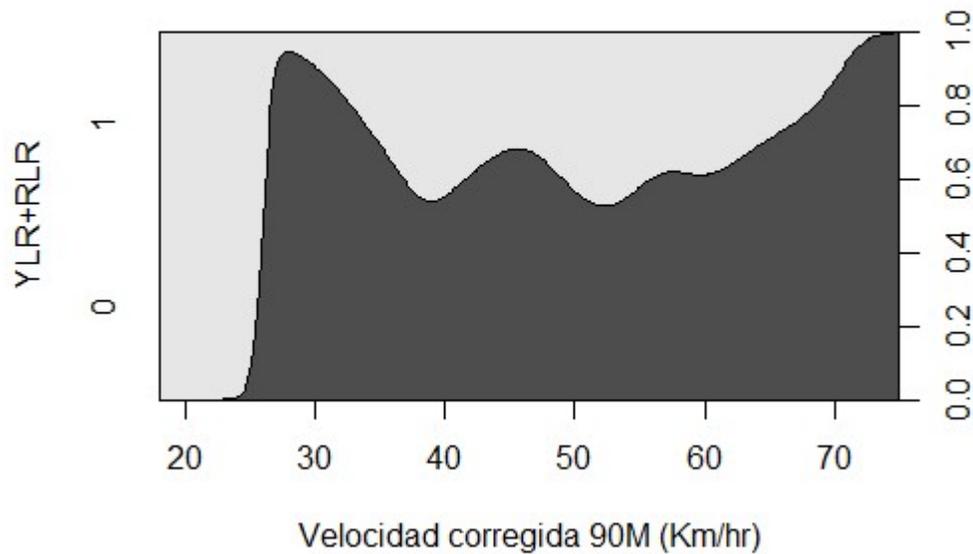
Fuente: Elaboración propia.

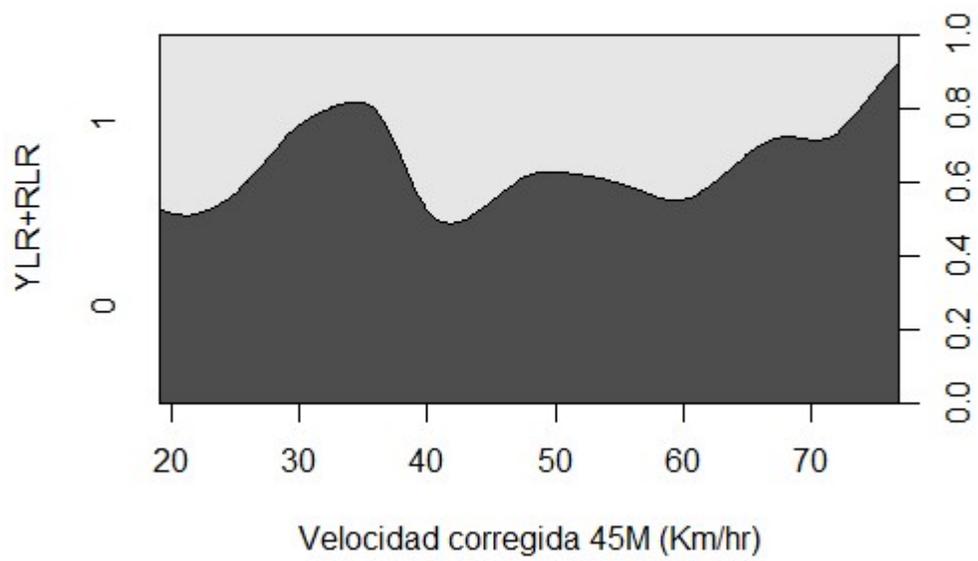
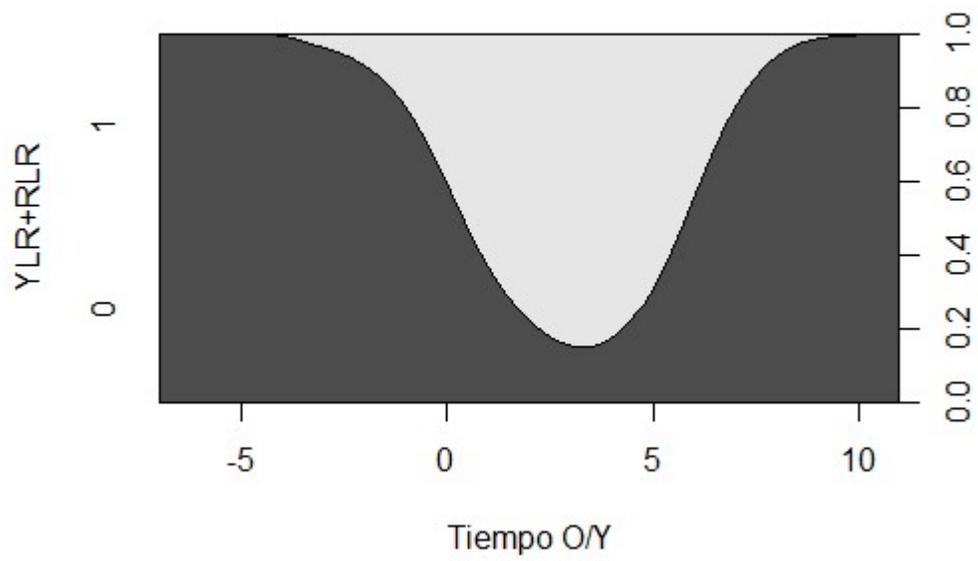
Tabla Anexo 3. Velocidades obtenidas en los aforos realizados el 29 de marzo de 2017 según la clasificación vehicular.

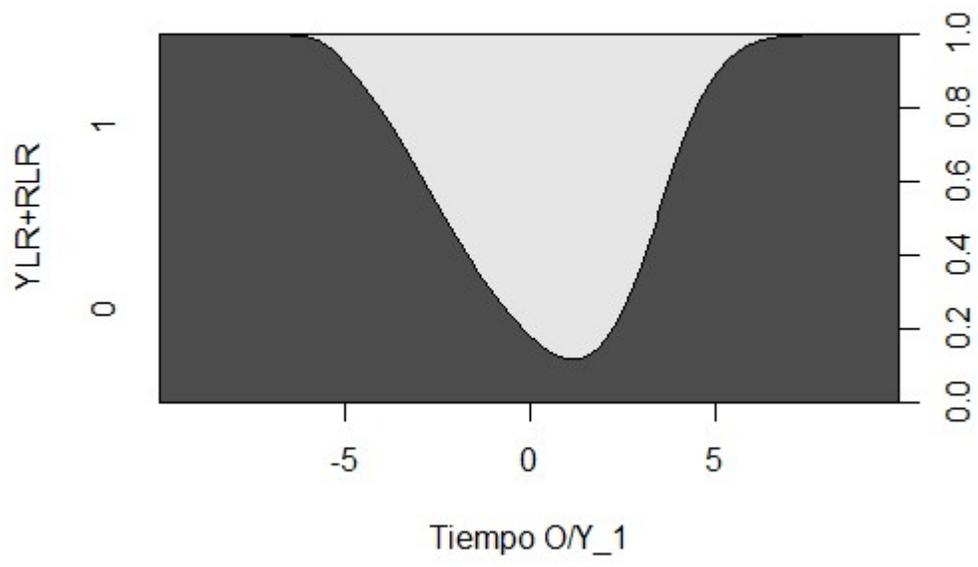
	Clasificación Vehicular		
	A	B	C
Volumen Veh Totales	392	25	23
Velocidad Promedio (Km/hr)	53.55	49.24	37.27
Volumen Veh Fase Verde	184	13	13
Velocidad Promedio Fase Verde (Km/hr)	61.45	59.77	37.77
Volumen Veh Intervalo Amarillo	12	1	0
Velocidad Promedio Intervalo Amarillo (Km/hr)	60.75	47	0
Volumen Veh Fase Rojo	196	11	10
Velocidad Promedio Intervalo Rojo (Km/hr)	45.7	37	36.6

Fuente: Elaboración propia.

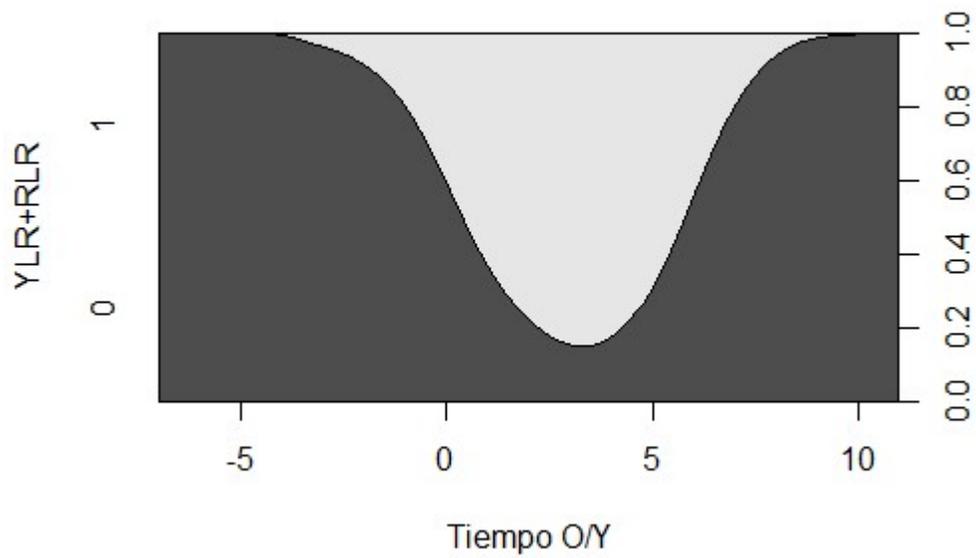
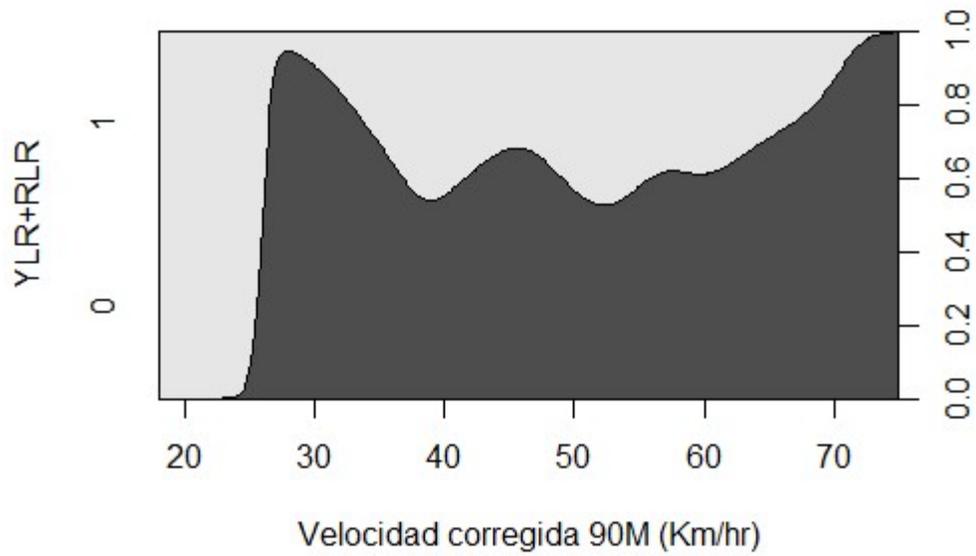
5 Gráficas de densidad condicional para modelo 7

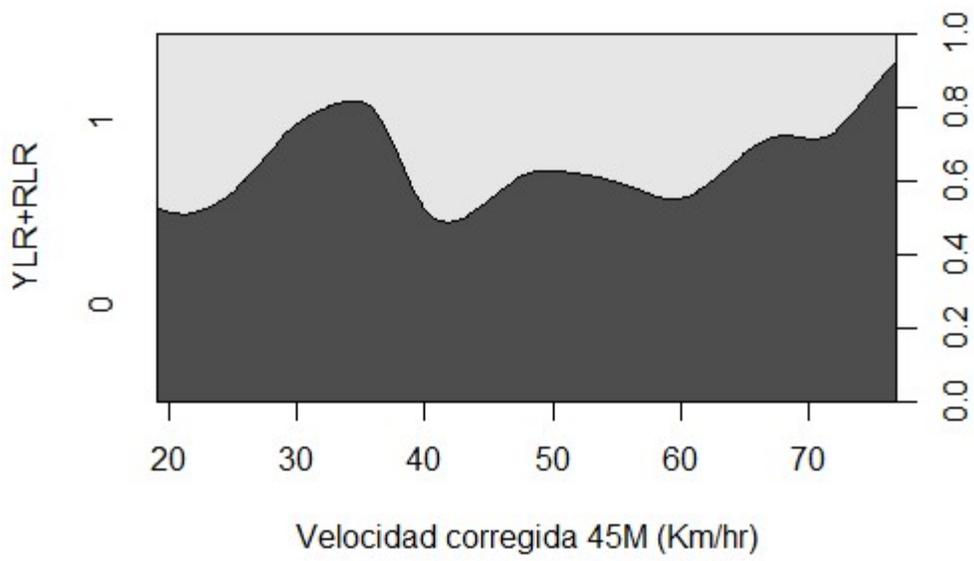




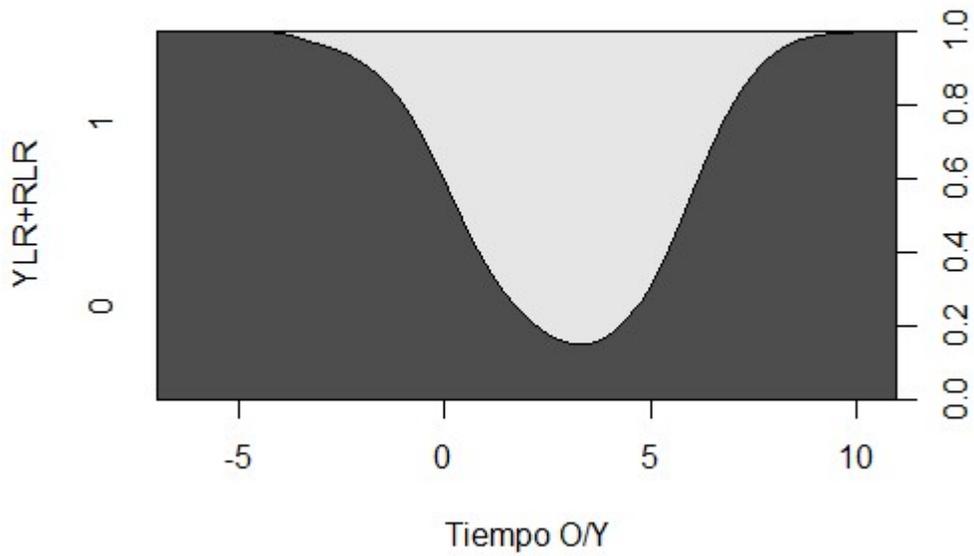


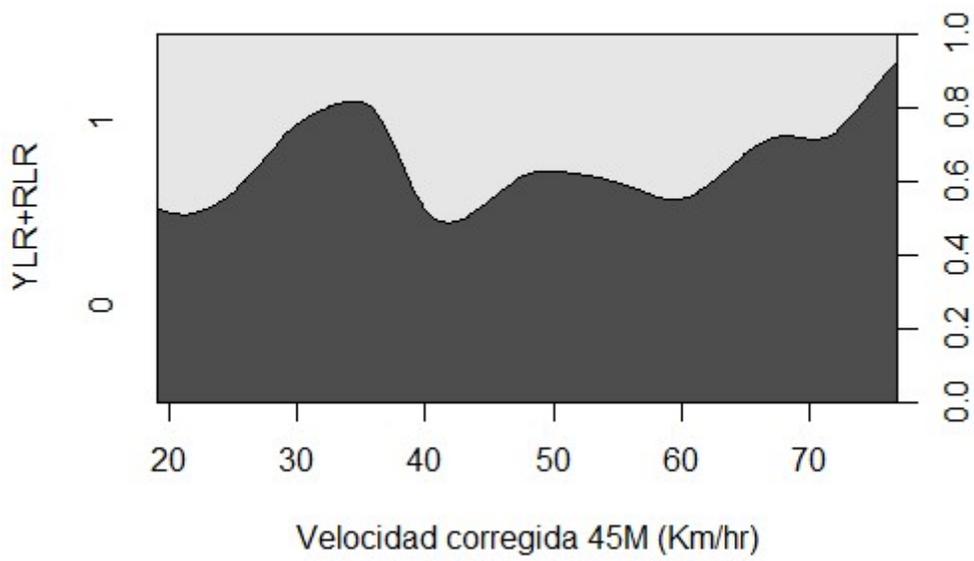
6 Gráficas de densidad condicional para modelo 8



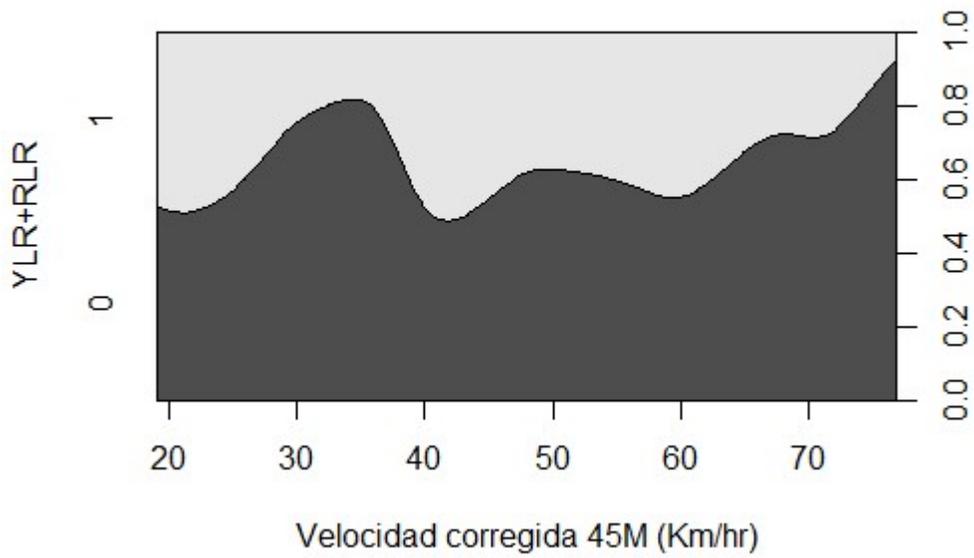


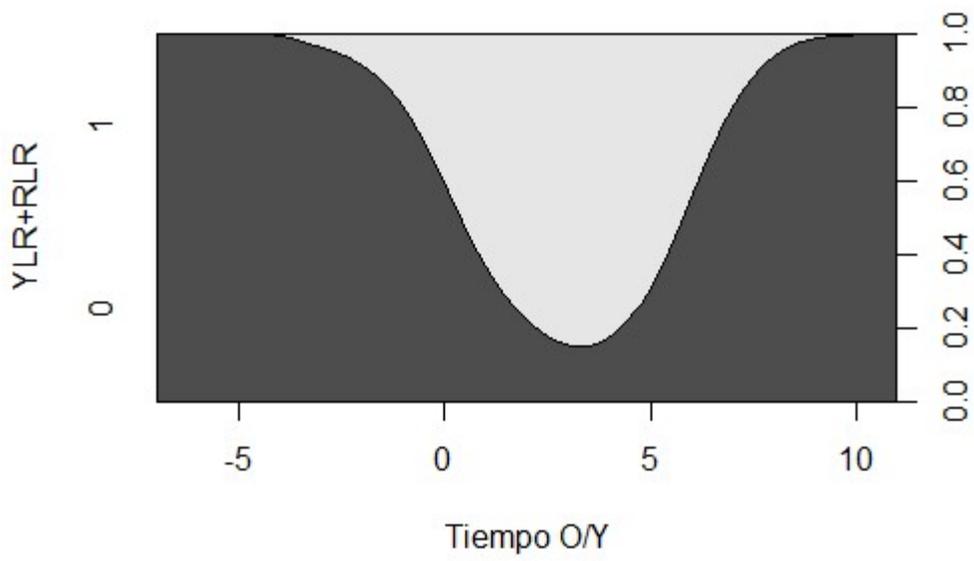
7 Gráficas de densidad condicional para modelo 9



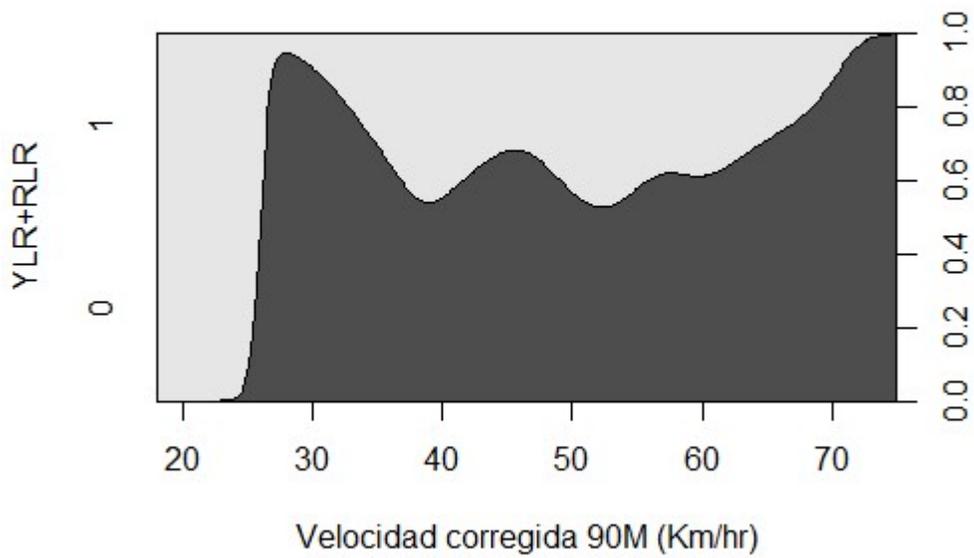


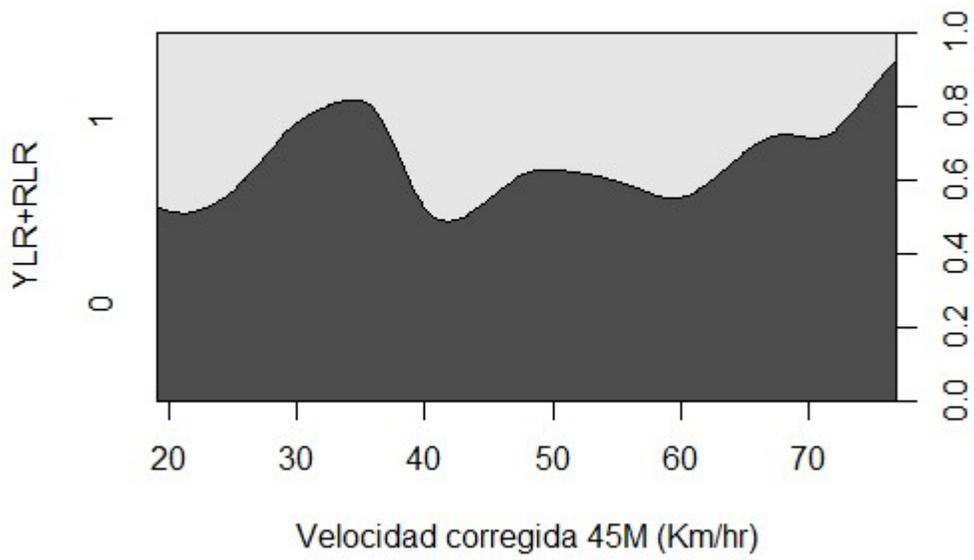
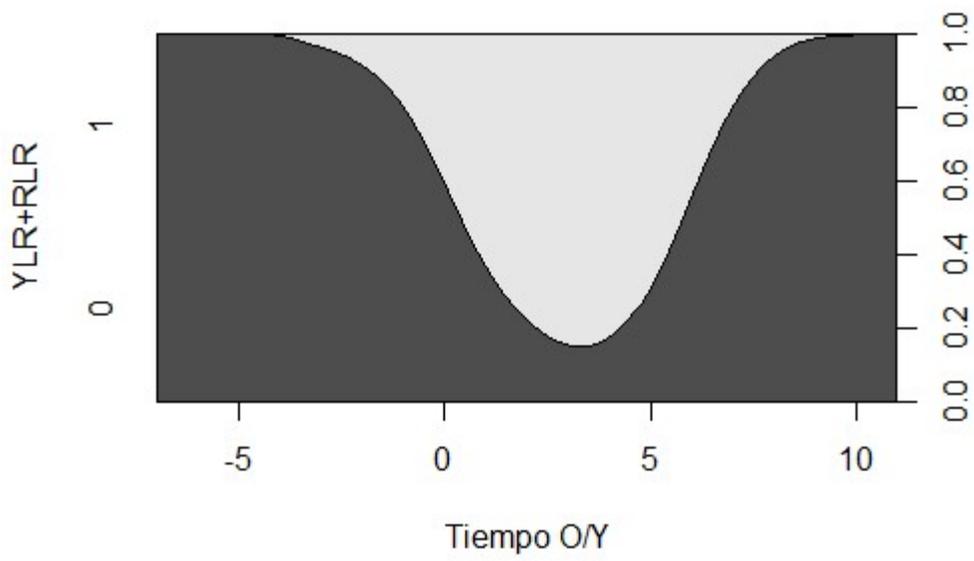
8 Graficas de densidad condicional para modelo 10



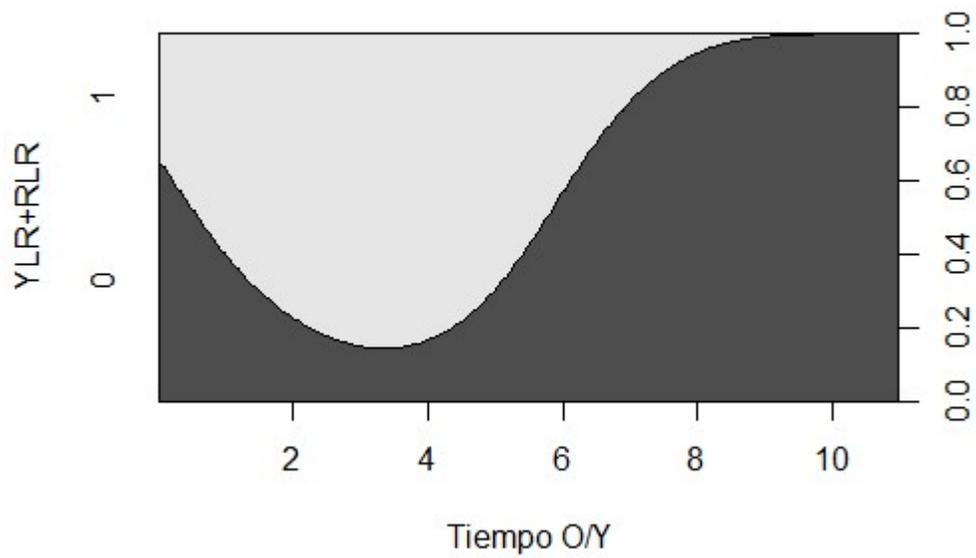
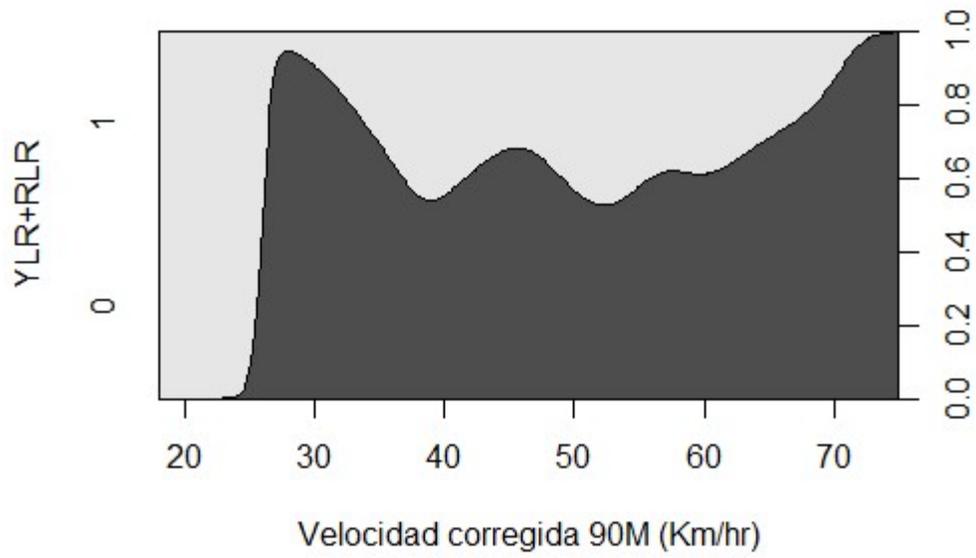


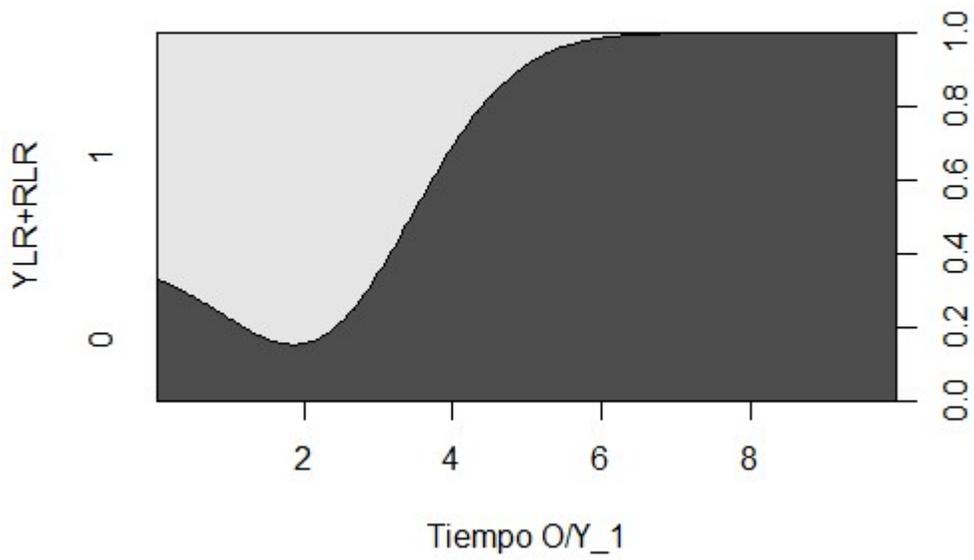
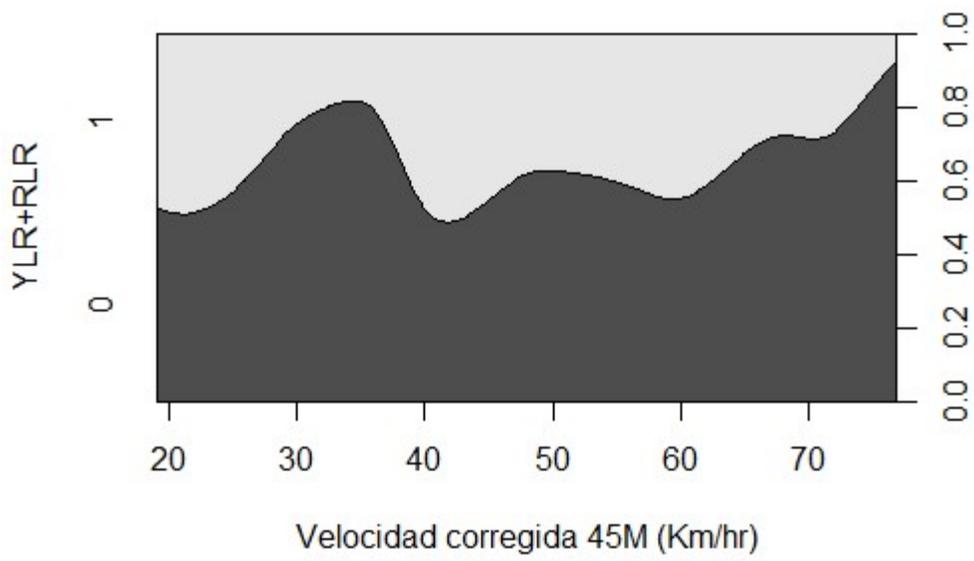
9 Gráficas de densidad condicional para modelo 11





10 Gráficas de densidad condicional para modelo 13





11 Gráficas de densidad condicional para modelo 14

