



Ministerio de Educación
Universidad Federal de la Integración Latinoamericana
Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio
Centro Interdisciplinario de Tecnología e Infraestructura
Ingeniería Civil de Infraestructura

“MODELAJE, ANÁLISIS Y PROPUESTA DE INTERVENCIÓN PARA UNA INTERSECCIÓN CONFLICTIVA EN ASUNCIÓN, PARAGUAY, POR MEDIO DE MICROSIMULACIÓN COMPUTACIONAL CON EL SOFTWARE PTV VISSIM.”

TOBÍAS AUGUSTO ÁVILA BOGARÍN

Foz de Iguazú, PR

Junio de 2023



Ministerio de Educación
Universidad Federal de la Integración Latinoamericana
Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio
Centro Interdisciplinario de Tecnología e Infraestructura
Ingeniería Civil de Infraestructura

“MODELAJE, ANÁLISIS Y PROPUESTA DE INTERVENCIÓN PARA UNA INTERSECCIÓN CONFLICTIVA EN ASUNCIÓN, PARAGUAY, POR MEDIO DE MICROSIMULACIÓN COMPUTACIONAL CON EL SOFTWARE PTV VISSIM.”

TOBIÁS AUGUSTO ÁVILA BOGARÍN

Trabajo de Conclusión de Curso presentado a la Banca Examinadora del Curso de Ingeniería Civil de Infraestructura de la UNILA, como parte de los requisitos para obtención de Grado de ***Licenciatura en Ingeniería Civil***.

Orientador: Prof. Dr. Noé Villegas Flores

Foz de Iguazú, PR

Junio de 2023



Ministerio de Educación

Universidad Federal de la Integración Latinoamericana
Instituto Latinoamericano de Tecnología, Infraestructura y Territorio

Centro Interdisciplinario de Tecnología e Infraestructura
Ingeniería Civil de Infraestructura

***“MODELAJE, ANÁLISIS Y PROPUESTA DE INTERVENCIÓN PARA UNA
INTERSECCIÓN CONFLICTIVA EN ASUNCIÓN, PARAGUAY, POR MEDIO DE
MICROSIMULACIÓN COMPUTACIONAL CON EL SOFTWARE PTV VISSIM.”***

BANCA EXAMINADORA

[Prof. Dr. Ing. Noé Villegas Flores](#)
UNILA - Brasil

[MSc. Ing. Juan Pablo Benítez González](#)
Transport Planner en Atkins; SNC-LAVALIN Group – Reino Unido

[Ing. Pablo Callizo](#)
Concejal Municipal de Asunción - Paraguay

[Ing. Lucas Vozzi](#)
Gerente Técnico de Tráfico en PTV Group América Latina - Argentina

[Prof. Dr. Ing. Leonardo Sierra-Varela](#)
Universidad de La Frontera - Chile

Foz de Iguazú, Paraná, 1 de Junio de 2023.

TERMO DE SUBMISSÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOSNome completo do autor: **TOBIÁS AUGUSTO ÁVILA BOGARÍN**Curso: **ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA**

<input checked="" type="checkbox"/> graduação	(.....) artigo
(.....) especialização	<input checked="" type="checkbox"/> trabalho de conclusão de curso
(.....) mestrado	(.....) monografia
(.....) doutorado	(.....) dissertação
	(.....) tese

Título do trabalho acadêmico:

**“MODELAJE, ANÁLISIS Y PROPUESTA DE INTERVENCIÓN PARA UNA INTERSECCIÓN
CONFLICTIVA EN ASUNCIÓN, PARAGUAY, POR MEDIO DE MICROSIMULACIÓN
COMPUTACIONAL CON EL SOFTWARE PTV VISSIM”.**

Nome do orientador:

Prof. Dr. Ing. Noé Villegas Flores.

Data da Defesa:

01/06/2023**Licença não-exclusiva de Distribuição**

O referido autor(a):

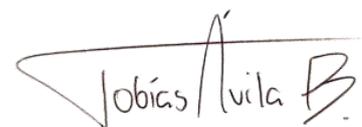
a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que o detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.

b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder à UNILA – Universidade Federal da Integração Latino-Americana os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.

Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não a Universidade Federal da Integração Latino-Americana, declara que cumpriu quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.

Na qualidade de titular dos direitos do conteúdo supracitado, o autor autoriza a Biblioteca Latino-Americana – BIUNILA a disponibilizar a obra, gratuitamente e de acordo com a licença pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguaçu, 1 de Junho de 2023

**Tobías Augusto Ávila Bogarín**

AGRADECIMIENTOS

“La gratitud no es solo la más grande de las virtudes, sino la madre de todas las demás”

- Marco Tullio Cicerón

Agradezco a mis queridos padres, **Malu** y **Gustavo**, por haberme obsequiado el privilegio de estudiar, y así poder convertirme en la persona que hoy soy.

Agradezco a mis familiares más cercanos por tanto apoyo, especialmente a mi querido e incondicional **Tío Taito**, y a mi amada **Tía Fanny**.

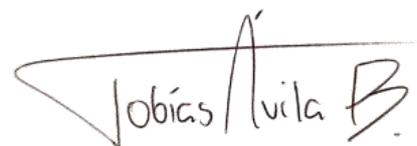
Agradezco a todos mis compañeros de universidad, especialmente a **Carlos, Giovanni, Alejandro, Rodrigo** y **Marcielly**, quienes caminaron conmigo cada una de las duras etapas de esta larga carrera de resistencia.

Agradezco a **todos mis amigos**, ellos saben quiénes son, porque desde afuera me apoyaron, inspiraron y empujaron a perseguir mis sueños cuando el horizonte se mostraba tormentoso.

Agradezco mi querido país **Brasil** y específicamente a la **UNILA**, por haberme brindado años de educación sobresaliente, gratuita y diferenciada, bajo su distinguido proyecto de integración latinoamericana, el cual que me permitió vivir experiencias únicas y formarme aún más como ciudadano global.

Agradezco al equipo de **PTV Group Latinoamérica**, por introducirme al mundo del modelado computacional de tráfico, por concederme una licencia de uso académico, y por haber posibilitado el descubrimiento de una pasión que ansío explorar como profesional en los tiempos venideros.

Finalmente, **quiero agradecerme a mí mismo**; sin mi propio apoyo, dedicación y perseverancia, ningún apoyo externo hubiese sido suficiente para conquistar este logro tan memorable.



RESUMEN

Debido a los patrones de movilidad urbana vigentes en la actualidad en la ciudad de Asunción, capital del Paraguay, donde se evidencia el alto crecimiento del parque automotor, la alta dependencia del vehículo particular, la escasa oferta de transporte público y los altos índices de accidentabilidad, la gestión del tráfico urbano presenta un gran desafío para la administración pública. La pobre planificación vial y urbanística de la ciudad, combinada con el aumento de la flota de vehículos particulares, principalmente automóviles y motocicletas, genera graves externalidades como la exagerada congestión vial, el rápido deterioro de la calidad de la infraestructura urbana, y la contaminación acústica y del aire. Esto se traduce en la drástica disminución de la calidad de vida de los ciudadanos, y en el aumento de casos de accidentes de tránsito. Bajo este contexto, profundizar en estudios de Ingeniería de Tránsito que posibiliten mejorar la gestión del tráfico urbano se vuelve una necesidad urgente para la sustentabilidad de la ciudad.

Este trabajo de conclusión de curso se enfoca inicialmente en el análisis cuantitativo y cualitativo del flujo de tráfico vehicular que circula a través de la intersección comprendida por la Av. Madame Lynch y la Calle Alejo Silva, en los límites de los barrios San Jorge y Ytay, en la periferia de la ciudad de Asunción. Posteriormente, por medio del software de simulación computacional de tráfico, *PTV Vissim*, se realiza el modelado del área de estudio para su posterior evaluación en cuanto a medidas de desempeño, como por ejemplo los tiempos de atraso, las distancias de cola, y los tiempos de viaje.

Se realiza así el modelado de una propuesta de intervención que busca elevar el nivel de servicio y seguridad vial de la intersección. La misma abraza eficaces estrategias de ingeniería de tránsito como lo son la implementación de binarios viales, eliminación de giros a la izquierda, semaforización optimizada, pavimentación de calles paralelas y señalizaciones verticales y horizontales.

Se contrasta el desempeño del escenario base con el escenario propuesto, y se evidencia que, por medio de las medidas implementadas, en la intersección se reduce el tiempo de viaje promedio en un 77.7% y se aumenta la velocidad de flujo en un 140%. Estos, y otros indicadores demuestran la eficacia del modelo propuesto, validando así la hipótesis inicial de este proyecto.

Palabras Clave: Seguridad Vial; Congestionamiento de Tráfico; Nivel de Servicio; Atraso Vehicular; Tiempo de Viaje.

RESUMO

Devido aos padrões de mobilidade urbana atualmente vigentes na cidade de Assunção, capital do Paraguai, onde é evidente o alto crescimento da frota automotiva, a alta dependência de veículos particulares, a escassa oferta de transporte público e os altos índices de sinistralidade, a gestão do tráfego urbano apresenta um grande desafio para a administração pública. O mau planejamento viário e urbano da cidade, aliado ao aumento da frota de veículos particulares, principalmente automóveis e motocicletas, gera graves externalidades como a excessiva congestão viária, a rápida deterioração da qualidade da infraestrutura urbana e a poluição sonora e do ar. Isto se traduz em uma queda drástica na qualidade de vida dos cidadãos e no aumento dos casos de acidentes de trânsito. Nesse contexto, o aprofundamento em estudos de Engenharia de Tráfego que possibilitem melhorar a gestão do tráfego urbano torna-se uma necessidade urgente para a sustentabilidade da cidade.

Este trabalho de conclusão de curso tem como foco inicial a análise quantitativa e qualitativa do fluxo de tráfego de veículos que circula pelo cruzamento entre a Avenida Madame Lynch e a Rua Alejo Silva, nos limites dos bairros San Jorge e Ytay, na periferia da cidade de Assunção. Posteriormente, através do software de simulação computacional de tráfego, **PTV Vissim**, procede-se à modelagem da área de estudo para a sua posterior avaliação em termos de medidas de desempenho, tais como tempos de atraso, distâncias em filas e tempos de viagem.

Assim, é realizada a modelagem de uma proposta de intervenção que busca elevar o nível de serviço e a segurança viária da interseção. A mesma abrange estratégias eficazes de engenharia de tráfego, como a implementação de binários de trânsito, eliminação de conversões à esquerda, semáforos otimizados, pavimentação de ruas paralelas e sinalização vertical e horizontal.

O desempenho do cenário base é contrastado com o cenário proposto, sendo evidente que através das medidas implementadas, na interseção, o tempo médio de viagem é reduzido em 77,7% e a velocidade de fluxo é aumentada em 140%. Esses e outros indicadores demonstram a eficácia do modelo proposto, validando assim a hipótese inicial deste projeto.

Palavras-chave: *Segurança Rodoviária; Congestionamento de Tráfego; Nível de serviço; Atraso do Veículo; Tempo de viagem*

ABSTRACT

Due to the urban mobility patterns currently in force in the city of Asunción, capital of Paraguay, where the high growth of the automotive fleet, the high dependence on private vehicles, the scarce offer of public transport and the high accident rates are evident, urban traffic management presents a great challenge for the public administration. The poor road and urban planning of the city, combined with the increase in the fleet of private vehicles, mainly cars and motorcycles, generates serious externalities such as excessive road congestion, the rapid deterioration of the quality of urban infrastructure, and sound and air pollution. This translates into a drastic decrease in the quality of life of its citizens, and an increase in cases of traffic accidents. In this context, deepening in Traffic Engineering studies that make it possible to improve urban traffic management becomes an urgent need for the sustainability of the city.

This thesis project initially focuses on the quantitative and qualitative analysis of the vehicular traffic flow that circulates through the intersection between Madame Lynch Avenue and Alejo Silva Street, in the limits between the San Jorge and Ytay neighborhoods, on the outskirts of the city of Asunción. Subsequently, by means of the computer traffic simulation software, *PTV Vissim*, the modeling of the study area is carried out for its subsequent evaluation in terms of performance measures, such as delay times, queue distances, and travel times.

Thus, the modeling of an intervention proposal that seeks to raise the level of service and road safety of the intersection is carried out. It embraces effective traffic engineering strategies such as the implementation of single-way streets, elimination of left turns, optimized traffic lights, paving of parallel streets, and vertical and horizontal signs.

The performance of the base scenario is contrasted with the proposed scenario, and it is evident that, through the implemented measures, the average travel time is reduced by 77.7% at the intersection and the flow speed is increased by 140%. These and other indicators demonstrate the effectiveness of the proposed model, thus validating the initial hypothesis of this project.

Keywords: *Road Safety; Traffic Congestion; Level of Service; Vehicle Delay; Travel time.*

LISTA DE TABLAS & GRÁFICOS

Tabla 1: Tasa de Crecimiento Poblacional, y Tasa de Crecimiento del Parque Automotor, por año, desde 2010 hasta 2023. Fuente: DRA (2023) & INE (2023)	26
Tabla 2: LOS para un segmento básico de carretera. Fuente: Adaptado de HCM (2010) .	61
Tabla 3: LOS de una intersección en base al Tiempo de Atraso. Fuente: Adaptado de HCM (2010)	61
Tabla 4: Velocidad Media en Vías estudiadas. Fuente: Adaptado de HCM (2010)	96
Tabla 5: Composición Vehicular y Volumen de Hora Pico. Fuente: Adaptado de HCM (2010)	97
Tabla 6: Número de Ocurrencias para cada Ruta Vehicular. Fuente: Autor	98
Tabla 7: Tiempos Semafóricos Actuales. Fuente: Autor	102
Tabla 8: Nombre de vías modeladas en PTV Vissim. Fuente: Autor	107
Tabla 9: Identificación de vías origen de flujo y posibles movimientos en PTV Vissim. Fuente: Autor	111
Tabla 10: Rango Usual de Valores para Calibración del Parámetro Lane Change Fuente: Adaptado Tabla 7.9 de FDOT (2020) y WisDOT (2021).....	119
Tabla 11: Resultados de Vehicle Performance Network para el Modelo Base. Fuente: Autor	131
Tabla 12: Resultados de Queue Counters para el Modelo Base Fuente: Autor	132
Tabla 13: Resultados de Travel Times para Modelo Base. Fuente: Autor	132
Tabla 14: Resultados de Nodes para Modelo Base. Fuente: Autor	133
Tabla 15: Validación GEH. Fuente: Autor	133
Tabla 16: Flujos de Tráfico para el Modelo Propuesto. Fuente: Autor	143
Tabla 17: Resultados de Vehicle Performance Network para el Modelo Propuesta. Fuente: Autor	153
Tabla 18: Resultados de Queue Counters para el Modelo Propuesta. Fuente: Autor	153
Tabla 19: Resultados de Vehicle Travel Times para el Modelo Propuesta. Fuente: Autor	153
Tabla 20: Resultados Nodes para el Modelo Propuesta. Fuente: Autor	154
Gráfico 1: Atraso Promedio del modelo Base x Propuesta. Fuente: Autor	155
Gráfico 2: Velocidad Promedio del modelo Base x Propuesta. Fuente: Autor	156
Gráfico 3: Paradas Promedio del modelo Base x Propuesta. Fuente: Autor	156
Gráfico 4: Tiempo Total Parado Promedio del modelo Base x Propuesta. Fuente: Autor	157
Gráfico 5: Atraso Total del modelo Base x Propuesta. Fuente: Autor	157
Gráfico 6: Colas del modelo base. Fuente: Autor	158
Gráfico 7: Colas del modelo propuesto. Fuente: Autor	158
Gráfico 8: Tiempo de Viaje Promedio del modelo Base x Propuesta. Fuente: Autor	159

Gráfico 9: Atraso Promedio en Av. M. Lynch N-S del modelo Base x Propuesta. **Fuente:**
Autor 159

Gráfico 10: Atraso Promedio en Av. M. Lynch S-N del modelo Base x Propuesta. **Fuente:**
Autor 160

Gráfico 11: Atraso Promedio en Alejo Silva E-O del modelo Base x Propuesta. **Fuente: Autor**
..... 160

Gráfico 12: Atraso Promedio en A. Silva O-E del modelo Base x Propuesta. **Fuente: Autor**
..... 161

Gráfico 13: Atraso Promedio en S. Buzó del modelo Base. **Fuente: Autor** 161

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1: Tasa de Flujo Máxima	46
Ecuación 2: Factor de Hora Pico.....	47
Ecuación 3: Velocidad	47
Ecuación 4: Velocidad Media de Viaje	48
Ecuación 5: Densidad Vehicular	48
Ecuación 6: Densidad Vehicular en función a la separación media.....	49
Ecuación 7: Headway Medio.....	49
Ecuación 8: Flujo Medio.....	49
Ecuación 9: Relación entre Velocidad, Flujo Medio y Densidad.....	50
Ecuación 10: Tiempo de Ciclo Semafórico.....	66
Ecuación 11: Validación GEH	78
Ecuación 12: Car Safety Distance.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolución de la población, del parque automotor y de la tasa de vehículos por cada mil habitantes, por año, desde 2010 hasta 2023.....	26
Figura 2: Distribución departamental de fallecidos a causa de siniestros viales en 2021. ...	28
Figura 3: Porcentaje de fallecidos en siniestros viales según tipo de usuarios, 2019.	28
Figura 4: Emisión anual de CO2 en el Área Metropolitana de Asunción (AMA) entre 2012 y 2017 (en gigagramos).....	29
Figura 5: Señalización Horizontal de Control de Tráfico en Pavimento.	38
Figura 6: Señalización Vertical de Control de Tráfico en una Intersección en Paraguay durante Campaña de Educación Vial.....	38
Figura 7: (a) Maniobra de Divergencia, (b) Maniobra de Convergencia, (c) Maniobra de Cruce.	39
Figura 8: Diferentes tipos de conflicto en una intersección vial.	40
Figura 9: Puntos de Conflictos entre vehículos y peatones en una intersección de 4 ramas.	40
Figura 10. Modelo de Flujograma de Tráfico.....	43
Figura 11: Gráfico de Variación Horaria del Volumen de Tráfico en una vía.	45
Figura 14: Ficha de Resumen de Conteo Volumétrico para Carreteras.	54
Figura 15: Modelo de Flujograma de Tráfico en UCP.	54
Figura 16: Nivel de Servicio A.....	57
Figura 17: Nivel de Servicio B.....	58
Figura 18: Nivel de Servicio C.....	58
Figura 19: Nivel de Servicio D.....	58
Figura 20: Nivel de Servicio E.....	59
Figura 21: Nivel de Servicio F.....	59
Figura 22: Nivel de servicio de un segmento básico de carretera, expresado en términos de velocidad operativa (operating speed) y la relación volumen-capacidad (V/C Ratio)	60
Figura 23: Ilustración de los conceptos de Movimiento y Fase.	63
Figura 24: Ilustración de los conceptos de Grupo de Movimientos y Grupo Semafórico.	63
Figura 25: Etapas de una Fase Semafórica	64
Figura 26: Ejemplo de Diagrama de Etapas.....	65
Figura 27: Ejemplo de Diagrama de Fases.....	65
Figura 28: Ilustración de un Ciclo Semafórico, en una intersección de cuatro ramas.....	66
Figura 29: Niveles de Modelado Computacional según escala.	71
Figura 30. Parámetros para Cambio de Carril.....	75

Figura 31: Flujograma del proceso de Modelaje y Calibración	77
Figura 32: Flujograma de la metodología del proyecto.....	79
Figura 33: Avenida Madame Lynch casi Av. Aviadores del Chaco.....	80
Figura 34: Av. Madame Lynch, representada por una línea roja, en el Mapa de Asunción, con su respectiva distribución barrial	81
Figura 35: Avenida Madame Lynch intersectándose con las Calles Alejo Silva y Sinfioriano Buzó	82
Figura 36: Vista expandida del área de estudio.	83
Figura 37: Estado de Conservación de Infraestructura Vial (1).	84
Figura 38: Estado de Conservación de Infraestructura Vial (2).	85
Figura 39: Estado de Conservación de Parada de Ómnibus.....	86
Figura 40: Vehículos realizando giros prohibidos a la izquierda.....	87
Figura 41: Situación del cruce entre Av. Madame Lynch y Alejo Silva.	88
Figura 42: Grado de Congestionamiento en horario pico de mañana.	88
Figura 43: Grado de Congestionamiento en horario pico de tarde.	89
Figura 44: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (1).....	90
Figura 45: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (2).....	90
Figura 46: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (3).....	91
Figura 47: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (4).....	91
Figura 48: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección E-O.....	92
Figura 49: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección N-S.....	92
Figura 50: Cola Vehicular a 800m de Av. M. Lynch y A. Silva. Vista con dirección N-S.	93
Figura 51: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista con dirección N-S.	93
Figura 52: Cola Vehicular de 650m debido a Av. M. Lynch y S. Buzó. Vista con dirección N-S.	94
Figura 53: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista con dirección S-N.	94
Figura 54: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista nocturna en planta (1).....	95
Figura 55: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista nocturna en planta (2).....	95
Figura 56: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista nocturna en dirección O-E.....	96
Figura 57: Puntos de Recolección de Datos de Campo.	97
Figura 58: Interfaz de uso de la App de conteo volumétrico Traffic Counter.	99
Figura 59: Vehículo Automóvil Tipo.	100
Figura 60 Vehículo de Carga considerado como Camión.	100
Figura 61: Vehículo de Carga considerado como Automóvil.....	101
Figura 62: Vehículo de Pasajeros considerado como Camión.	101
Figura 63: Diagrama de Fases Semafóricas en M. Lynch y S. Buzó.....	102
Figura 64: Prestaciones de la Licencia Académica del Software PTV Vissim.	103

Figura 65: Interfaz Gráfica inicial en Software PTV Vissim.....	104
Figura 66: Configuración de Unidades de Medidas en PTV Vissim.....	104
Figura 67: Inserción de Imagen de Fondo en PTV Vissim.	105
Figura 68: Modelado de vías de tráfico en PTV Vissim.....	106
Figura 69: Ejemplo de identificación de Link en PTV Vissim.....	108
Figura 70: Volúmenes de Tráfico en las vías.	108
Figura 71: Tipos de Composición Vehicular para vías arteriales y colectoras.	109
Figura 72: Rutas vehiculares para la Av. Madame Lynch N-S.	110
Figura 73: Áreas de Conflicto vehicular en Av. Madame Lynch N-S y Alejo Silva.	112
Figura 74: Área de Conflicto vehicular entre Av. Madame Lynch N-S y el giro a la derecha en Alejo Silva O-E (O).	113
Figura 75: Parámetros de calibración del comportamiento de conducción en PTV Vissim.	114
Figura 76: Ilustración de los subparámetros de seguimiento general.....	114
Figura 77: Valores de subparámetros de seguimiento, en PTV Vissim.	115
Figura 78: Ilustración de significados de la Ecuación 12.	116
Figura 79: Valores de subparámetros de Modelo de Seguimiento Vehicular, en PTV Vissim.	117
Figura 80: Ilustración de Tipos de Cambio de Carril.	117
Figura 81: Valores de subparámetros de Cambio de Carril adoptados, en PTV Vissim.	120
Figura 82: Esquematización del Periodo de Simulación.....	121
Figura 83: Valores adoptados para Parámetros de Simulación.....	122
Figura 84: Configuración de Métodos de Evaluación de Desempeño.	124
Figura 85: Comportamiento impreciso del modelo base en Av. M. Lynch con A. Silva.....	125
Figura 86: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista E-O (1).....	126
Figura 87: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista S-N (1).	127
Figura 88: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista S-N (2).	127
Figura 89: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista E-O (2).	128
Figura 90: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista S-N (3).	128
Figura 91: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista N-S.	129
Figura 92: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista N-S (1).....	129
Figura 93: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista S-N (1).....	130
Figura 94: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista N-S (2).....	130
Figura 95: Estancamiento de vehículos en el espacio central de cruce en Av. Madame Lynch y Alejo Silva O-E.....	135
Figura 96: Obstrucción total de Av. Madame Lynch N-S por parte de vehículos oriundos de A. Silva O-E.	135

Figura 97: Bloqueo de espacio de Giro para vehículos oriundos de Av. M. Lynch S-N con destino a A. Silva O-E (2).	136
Figura 98: Sobreocupación del Carril de salida de A. Silva O-E.....	136
Figura 99: Propuesta Modelada en Av. M. Lynch y A. Silva (1).....	137
Figura 100: Propuesta Modelada en Av. M. Lynch y A. Silva (2).....	138
Figura 101: Propuesta Modelada en A. Silva y M. Lynch (1).....	138
Figura 102: Propuesta Modelada en A. Silva y M. Lynch (2).....	139
Figura 103: Propuesta Modelada en M. Lynch y S. Buzó (1)	139
Figura 104: Propuesta Modelada en M. Lynch y S. Buzó (2)	140
Figura 105: Propuesta Modelada en M. Lynch y S. Buzó (3)	140
Figura 106: Propuesta Modelada en A. Silva O-E y Av. M. Lynch (1)	141
Figura 107: Propuesta Modelada en A. Silva O-E y Av. M. Lynch (2)	142
Figura 108: Propuesta Modelada entre S. Buzó y A. Silva E-O.....	142
Figura 109: Diagrama de Fases del modelo propuesto.....	144
Figura 110: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (1).	144
Figura 111: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (2).	145
Figura 112: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (3).	145
Figura 113: Comportamiento de la propuesta en Salvador Bogafo y A. Silva E-O.	146
Figura 114: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (4).	146
Figura 115: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (5).	147
Figura 116: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (6).	147
Figura 117: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (7).	148
Figura 118: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (8).	148
Figura 119: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (9).	149
Figura 120: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (10).	149
Figura 121: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (1).....	150
Figura 122: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (2).....	150
Figura 123: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (3).....	151
Figura 124: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (4).....	151
Figura 125: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (5).....	152
Figura 126: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (6).....	152
Valores parciales obtenidos durante el proceso de conteo de tráfico.....	167

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	23
1.1 DESARROLLO URBANO Y MOVILIDAD EN AMÉRICA LATINA.....	23
1.2 DEMOGRAFÍA, MODELO DE MOVILIDAD E IMPLICANCIAS.....	25
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	32
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	34
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	34
1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO.....	35
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	36
2.1 VÍAS DE TRÁFICO.....	36
2.1.1 VÍAS URBANAS.....	36
2.1.2 VÍAS RURALES.....	37
2.2 INTERSECCIONES.....	37
2.2.1 Tipos de Intersecciones.....	37
2.2.2 Puntos de Conflicto.....	39
2.3 PROYECTO DE INTERSECCIONES.....	42
2.3.1 Datos Funcionales.....	42
2.3.2 Datos Físicos.....	42
2.3.3 Datos de Tráfico.....	42
2.3.4 Datos de Accidentes.....	43
2.3.5 Datos Económicos.....	44
2.4 CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO VEHICULAR.....	44
2.4.1 Volumen.....	44
2.4.2 Velocidad.....	47
2.4.3 Densidad.....	48
2.4.4 Relaciones de Volumen, Velocidad y Densidad.....	50
2.5 CONTEO VOLUMÉTRICO.....	50
2.5.1 Conteo Manual.....	51
2.6 NIVEL DE SERVICIO.....	55
	20

2.7 SEMAFORIZACIÓN	62
2.8 MÉTODOS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE INTERSECCIONES	67
3 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE TRÁFICO	70
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	70
3.2 MICROSIMULACIÓN	72
3.3 PTV VISSIM	73
3.3.1 Algoritmos de Modelaje	74
3.3.2 Calibración y Validación de la Simulación.....	76
4 METODOLOGÍA DE PROYECTO	79
5 ESTUDIO DE CASO.....	80
5.1 PRESENTACIÓN DE LA INTERSECCIÓN.....	80
5.2 RELEVAMIENTO DE DATOS DE LA INTERSECCIÓN.....	84
5.2.1 Observaciones Iniciales	84
5.2.2 Datos de Tráfico	96
5.3 CREACIÓN DE ESCENARIO ACTUAL EN <i>PTV VISSIM</i>	103
5.3.1 Presentación del Software	103
5.3.2 Geolocalización e Imagen De Fondo	105
5.3.3 Vías (<i>Links</i>).....	105
5.3.4 Volúmenes Vehiculares (<i>Vehicle Inputs</i>).....	108
5.3.5 Rutas Vehiculares (<i>Vehicle Routes</i>).....	109
5.3.6 Áreas De Conflicto (<i>Conflict Areas</i>).....	111
5.3.7 Calibración de Parámetros de Modelaje	113
5.3.8 Parámetros de Simulación	120
5.3.9 Método de Evaluación de Desempeño	122
5.3.10 Validación de Resultados de Simulación	124
5.4 RESULTADOS DEL ESCENARIO ACTUAL.....	125
5.4.1 Proceso de Calibración del Modelo.....	125
5.4.2 Imágenes del comportamiento del Modelo Base en PTV Vissim	126
5.4.3 Resultados de Medidas de Desempeño del Modelo Base	131
5.4.4 Validación del Modelo Base con GEH Statistics	133

5.5 PROPUESTA DE INTERVENCIÓN EN LA INTERSECCIÓN	134
5.5.1 Análisis de Situación Actual	134
5.5.2 Propuestas de Modificaciones a la Red Vial	136
5.5.3 Imágenes del Comportamiento de la Propuesta en <i>PTV VISSIM</i>	144
5.5.4 Resultado de Medidas de Desempeño de la Propuesta.....	153
6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	155
6.1 Comparación de resultados de VEHICLE NETWORK PERFORMANCE.....	155
6.2 Comparación de resultados de QUEUE COUNTER	158
6.3 Comparación de resultados de VEHICLE TRAVEL TIMES.....	159
6.4 Comparación de Resultados de NODES	159
7 CONCLUSIÓN Y REFLEXIONES.....	162
8 ANEXOS.....	164
8.1 Órganos Brasileños De Tránsito.....	164
8.2 Factor de Equivalencia de UCP para diferentes tipos de vehículos	165
8.3 Tabla de para Validación de la Calibración del Modelo en PTV Vissim.....	166
8.4 Contador Manual Múltiple	167
8.5 Equipo de Voluntarios de Apoyo.....	168
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	169

1 INTRODUCCIÓN

1.1 DESARROLLO URBANO Y MOVILIDAD EN AMÉRICA LATINA

En las últimas décadas, las ciudades de América Latina han sufrido una rápida transformación, pasando de pequeñas urbes a metrópolis e incluso megalópolis. No obstante, el desarrollo de servicios públicos y la inversión en infraestructura no han sido suficientes para acompañar este crecimiento, resultando en una disminución de la calidad de vida de los ciudadanos (CAF, 2011).

América Latina ha experimentado un notable crecimiento demográfico relacionado con un proceso de urbanización intenso y descontrolado. La región pasó de 168,3 millones de habitantes en 1950 a 660,3 millones de personas en 2022, cifra que representa el 8,3% de la población mundial (CEPAL, 2022), la cifra actual supone más del doble de la población registrada en 1975, cuando había 316 millones de personas. Este crecimiento poblacional ha afectado la calidad de vida en las ciudades, debido a la intensa demanda de servicios públicos que no es satisfecha por las ejecuciones presupuestarias gubernamentales.

Por otro lado, con el crecimiento robusto de ingresos y la expansión de la clase media, se ha generado un aumento rápido de la propiedad de automóviles y motocicletas, fenómeno que contribuye a la expansión urbana y al uso intensivo de una infraestructura vial limitada, que además debe satisfacer adecuadamente las necesidades de transporte colectivo. Este patrón de movilidad produce externalidades negativas significativas, como la contaminación del aire, la accidentalidad y la congestión vial, que alcanzan números gigantescos especialmente en ciudades como Buenos Aires, São Paulo y Ciudad de México (CAF, 2011).

La desestructurada metodología de uso y ocupación de suelo en las áreas urbanas, reflejada en la distribución desigual de empleos y servicios, da lugar a un patrón caótico de movilidad de personas y mercancías. Esto genera graves problemas para los grupos más vulnerables, como peatones y ciclistas, quienes enfrentan la falta de vías transitables y cruces seguros, así como para la mayoría de la población que depende del transporte público, el cual se caracteriza por su reducida oferta, mala calidad del servicio y altas tarifas, (BID, 2018). Esto es respaldado por Vasconcellos y Mendoza (2016), al mostrar que, en comparación a los usuarios de automóviles y motocicletas, los usuarios de transporte público, quienes poseen menor poder adquisitivo, pierden alrededor de un 75% más de tiempo en desplazarse y gastan alrededor del 30% de sus ingresos en ello.

A pesar del aumento de las inversiones en infraestructura para el transporte en general en los últimos tiempos, la oferta de transporte público y de infraestructura vial de alta calidad no ha crecido al mismo ritmo que la demanda de transporte. Además, la deficiente planificación, operación y supervisión de las instituciones estatales ha exacerbado la ineficiencia e informalidad de los sistemas de transporte urbano (Pazos, 2016), lo que ha

contribuido a condiciones caóticas e inseguras de movilidad, así como al aumento de los niveles de congestión y contaminación, especialmente en las ciudades de ingresos bajos y medios de América Latina y el Caribe (BID, 2013).

En el año 2010, la tasa promedio de víctimas relacionadas con accidentes de tráfico en América Latina y el Caribe (ALC) fue de 25,3 por cada 100.000 habitantes, en comparación con los 16,1 por cada 100.000 habitantes reportados en Estados Unidos y Canadá (BID, 2013). Además, en algunas ciudades de la región, el tiempo promedio de un viaje interurbano puede llegar a ser de hasta dos horas, lo que genera gastos significativos en tiempo y dinero para el transporte de mercancías y pasajeros (UN-Habitat, 2012).

Un informe del *Clean Air Institute* reveló que excesivos niveles de contaminantes nocivos del aire están presentes en numerosas ciudades de ALC, y superan las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Esto impacta en la calidad de vida de los ciudadanos, al causar muertes prematuras, enfermedades, y dañar los ecosistemas (Green y Sánchez, 2013).

1.2 DEMOGRAFÍA, MODELO DE MOVILIDAD E IMPLICANCIAS

En términos generales y demográficos, Paraguay tiene una extensión de 406.752 km^2 y una población proyectada de 7.554.796 de habitantes para el año 2023 (Banco Mundial, 2020; INE, 2023), caracterizado así, como un país relativamente pequeño en América del Sur.

Desde la década de los años 70 hasta la actualidad, el país experimenta un proceso de urbanización acelerado; en 1971 el 31% de la población era urbana (Banco Mundial, 2021), mientras que en el actual año 2023 esta cifra ha ascendido al 63,7%, estimando que para el año 2025 el 64,4% de la población tendrá un perfil plenamente urbanizado (INE, 2023).

De los 17 departamentos que constituyen la distribución político-administrativa del país, el departamento Central es el más poblado del país con 2.328.453 habitantes, que, sumado a los 521.091 habitantes del Distrito Capital Asunción, reúne el 37,7% de la población del país, es decir, 2.849.544 habitantes (INE, 2023).

A pesar de que la capital, Asunción, haya disminuido su población en 9.474 habitantes en el periodo de 2003 al 2023, un crecimiento poblacional considerable se ha registrado en el Departamento Central, el cual compone el Área Metropolitana de Asunción (AMA), con un aumento neto de 1.585.720 habitantes en el mismo periodo (INE, 2015).

Debido al crecimiento demográfico, al incentivo estatal sobre el uso de vehículos particulares y a la escasa oferta de transporte público, el parque automotor ha crecido exponencialmente en la última década. Según el Instituto Nacional de Estadísticas, en 2010 el número total de rodados registrados en el país era de 890.931 (INE, 2019), mientras que en la actualidad (2023) este número ha ascendido a 2.844.243 (DRA, 2023); evidenciándose un crecimiento del 220% en tan solo 13 años, aproximadamente la triplicación de la flota total de vehículos registrados, según el Gráfico 1.

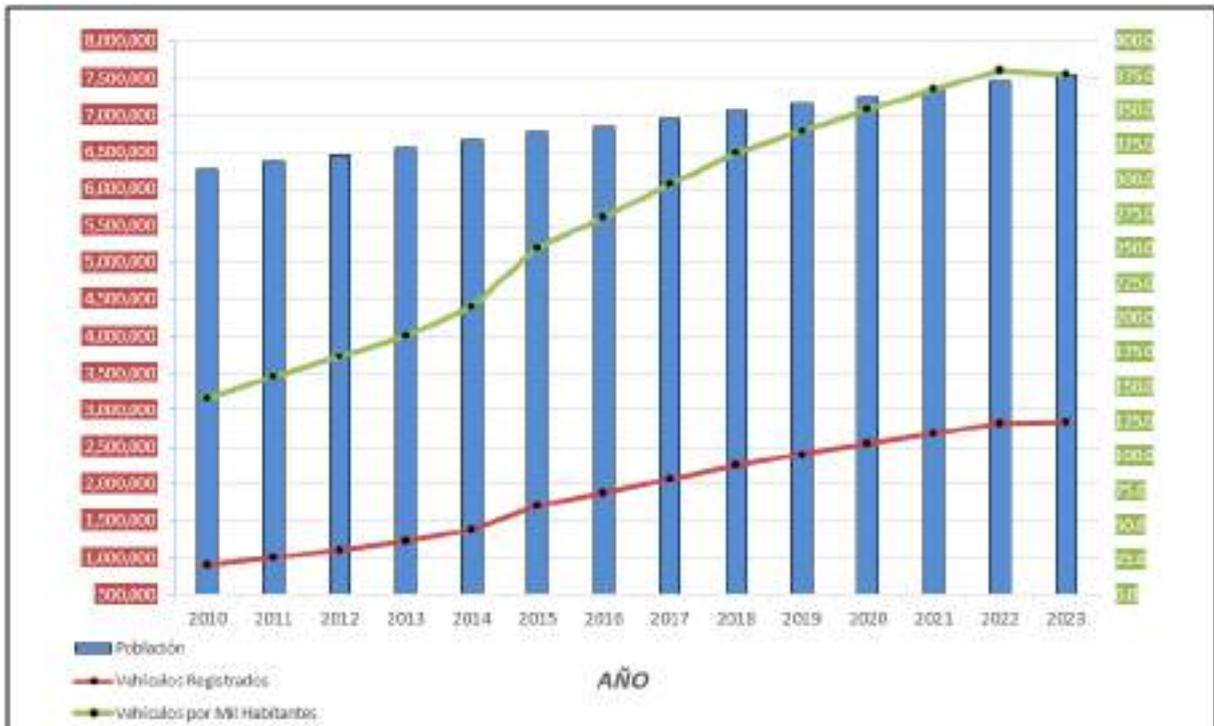


Figura 1: Evolución de la población, del parque automotor y de la tasa de vehículos por cada mil habitantes, por año, desde 2010 hasta 2023.

Fuente: (Elaboración Propia en base a DRA (2023) & INE (2023))

Así, en el año 2010 se registraron 142,2 vehículos por cada mil habitantes en el país, cifra que se elevó hasta 378,5 vehículos por mil habitantes para el 2022, con una variación del 165% (DRA, 2023), como se puede observar en el Gráfico 1.

Año	Tasa de Crecimiento Poblacional (%)	Tasa de Crecimiento del Parque Automotor (%)
2010	-	-
2011	1.554	12.208
2012	1.536	11.039
2013	1.517	10.468
2014	1.497	12.722
2015	1.480	22.559
2016	1.462	10.389
2017	1.446	10.175
2018	1.429	9.246
2019	1.414	6.438
2020	1.397	5.927
2021	1.386	5.751
2022	1.367	5.016
2023	1.356	-
Media (%)	1.449	10.171

Tabla 1: Tasa de Crecimiento Poblacional, y Tasa de Crecimiento del Parque Automotor, por año, desde 2010 hasta 2023.

Fuente: DRA (2023) & INE (2023)

A pesar de que la media de la tasa de crecimiento poblacional interanual de Paraguay entre 2010 y 2023 se mantenga estable, alrededor del 1,45%, la tasa de crecimiento promedio del parque automotor en el mismo periodo fue de 10.2%, como observado en la Tabla 1. Esto evidencia el desproporcional aumento de los rodados registrados en el país, y en parte, la fuente de gran parte de los problemas de tráfico que hoy azotan al área metropolitana de Asunción (AMA).

Actualmente, se encuentran registrados 844.980 vehículos en el departamento central, y 490.369 en Asunción (DRA, 2023), asimismo, se estima que alrededor de 600.000 vehículos particulares y 2.400 ómnibus ingresan a la capital diariamente, en su mayoría por motivos laborales, totalizando alrededor de 1.320.000 personas (La Nación, 2016).

Uno de los aspectos más preocupantes del crecimiento descontrolado del parque automotor es su impacto en el número de accidentes de tránsito que ocurren en todo el país, aunque más puntualmente en el departamento Central.

La Policía Nacional, en 2021, registró un total de 48.706 llamadas al servicio de emergencia 911 caracterizadas como reportes de siniestros viales (ANTSV, 2022).

En Paraguay, los accidentes de tráfico son la principal causa de muerte en adolescentes y jóvenes de entre 15 y 29 años (UNRSF, 2021). En el año 2021 hubo 15.515 personas lesionadas y 980 personas fallecidas en accidentes de tránsito a nivel país.

Como se observa en el Gráfico 2, los departamentos que han registrado mayores *cifras de fallecidos* en siniestros viales en 2021 han sido Central, Caaguazú y San Pedro. Se evidencia también que Asunción y Central concentran así el 23% de los accidentes con derivación fatal. De la misma manera, según ANTSV (2022), el 35% de los *lesionados* en siniestros viales pertenecen a los departamentos de Central, Cordillera y la ciudad de Asunción.

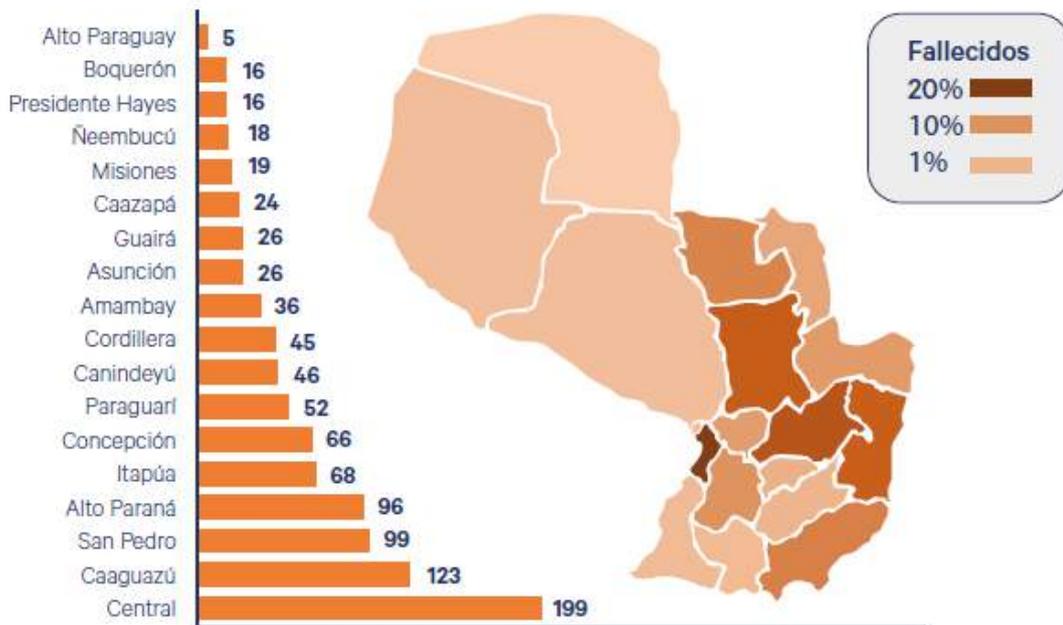


Figura 2: Distribución departamental de fallecidos a causa de siniestros viales en 2021.

Fuente: ANTSV, 2022

Como expuesto en la Figura 3, el grupo de usuarios más vulnerable a fatalidades en accidentes viales son los motociclistas, representando al 55% de los fallecidos en 2019, mientras que los peatones son el segundo grupo más expuesto, con el 21%.

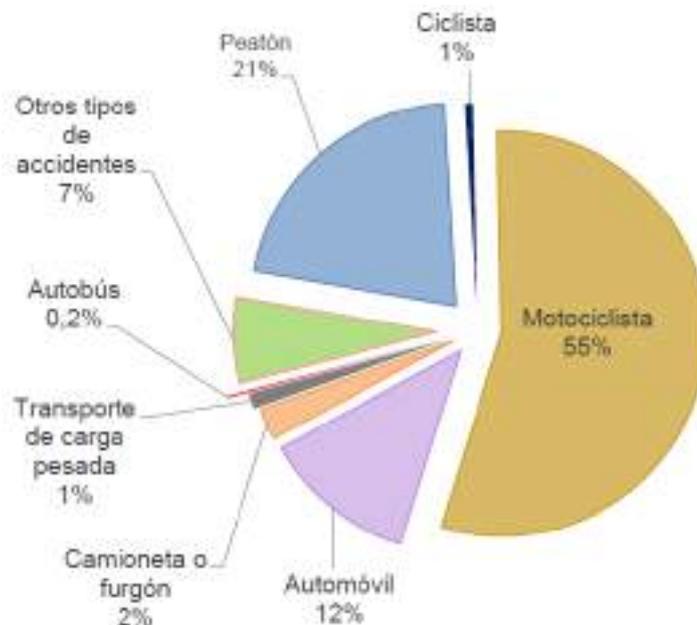


Figura 3: Porcentaje de fallecidos en siniestros viales según tipo de usuarios, 2019.

Fuente: ANTSV, 2022

En el año 2018, la tasa de mortalidad por accidentes de tránsito en Paraguay fue de 16,5 por cada 100.000 habitantes, lo cual es significativamente mayor en comparación con

otros países de la región como Argentina (12,7), Uruguay (13,5) y Chile (10,5). Esta tasa de mortalidad por accidentes viales sitúa a Paraguay como el sexto país con mayor número de muertes en accidentes de tráfico en todo el continente (BID, 2020).

Los números de siniestralidad y fallecidos hacen eco en la sociedad y exclaman la necesidad de tomar acciones urgentes en materia de seguridad vial para garantizar que todos los medios de transporte sean seguros para los ciudadanos.

A pesar de estos números, durante los últimos años, el uso extendido de vehículos particulares, como automóviles y motocicletas, sigue siendo predominante en comparación al uso del transporte público, el cual actualmente se limita a una sola opción: *el autobús*. Esto prueba que el aumento reciente en la población no ha sido acompañado por políticas públicas efectivas para la movilidad urbana y el transporte público, lo cual ha generado la saturación de las vías, no solo de la capital, siendo ella el principal destino de migrantes pendulares del AMA, sino también las vías de toda la región metropolitana (PNUD et al, 2021).

De acuerdo con el resumen del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) del 2015, la categoría "*energía y transporte*", mayoritariamente representada por el transporte (88,33%), es responsable del 12,03% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales tienen un impacto negativo en el equilibrio térmico y climático del planeta (PNUD et al, 2021).

La principal razón por la cual el sector de transporte contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero se debe a su dependencia en una fuente de energía no renovable, es decir, el petróleo. Según el Balance Energético Nacional de 2018, nuestro país importó 2.705,93 miles de toneladas equivalentes de petróleo (TEP) en forma de derivados del petróleo, de los cuales más del 90% se consumió en el transporte y el resto en residencias e industrias. Adicionalmente, es importante resaltar que el combustible tipo *diesel*, destacado por su poder generador de CO₂, es el más importado y utilizado en país. (PNUD et al, 2021).

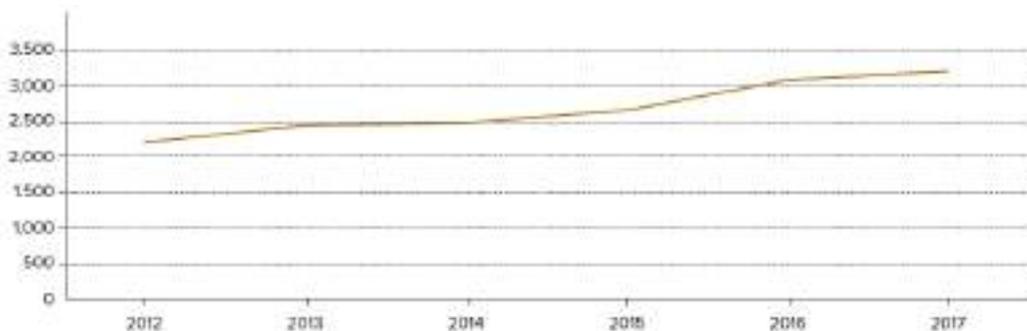


Figura 4: Emisión anual de CO₂ en el Área Metropolitana de Asunción (AMA) entre 2012 y 2017 (en gigagramos)

Fuente: (PNUD et al, 2021).

En cuanto a la contaminación del aire en zonas urbanas específicamente, los dos gases más presentes son los óxidos de nitrógeno (NOx) y las partículas en suspensión. Los óxidos de nitrógeno se encuentran principalmente en los gases emitidos por los escapes de los vehículos; los mismos irritan las vías respiratorias y aumentan la sensibilidad de los bronquios a las infecciones, lo que agrava la vulnerabilidad de los niños pequeños y las personas con asma. Por otro lado, las partículas en suspensión son principalmente emitidas por vehículos diésel y sistemas de frenos; los cuales acarrearán en múltiples consecuencias negativas para el cuerpo humano, especialmente en los bronquios (PNUD et al, 2021).

Resumidamente, según AIA (2016), el tránsito vehicular en Asunción se caracteriza por poseer:

1. Alta dependencia del vehículo particular.
2. Escasez de servicios de transporte público de calidad.
3. Mal diseño y ubicación de intersecciones.
4. Ineficiente programación semafórica.
5. Congestionamiento por la saturación de vías de acceso a la ciudad.
6. Alta accidentalidad.
7. Bajo control del cumplimiento de las reglas de tránsito.
8. Deterioro constante de infraestructura vial, principalmente pavimentos.

Estos datos presentan un escenario preocupante para el futuro de Asunción y su área metropolitana, ya que no existen evidencias suficientes para suponer que el paradigma de movilidad actual vaya a cambiar significativamente; impidiendo que se atenúen las consecuencias negativas del mismo en la calidad de vida de los ciudadanos.

Según Seiler (2018), la falta de políticas de transporte colectivo atractivas está estrechamente relacionada con el crecimiento urbano desordenado. Esto resulta en desplazamientos más extensos y tiempos de viaje más largos, el aumento de accidentes y siniestros relacionados al tráfico, el deterioro de la calidad del aire y problemas de salud relacionados, el estrés debido al caos urbano, y una mayor tendencia a la cultura del individualismo.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Aunque la inoportuna situación en la que se encuentra el Área Metropolitana de Asunción pueda parecer inmutable, es importante resaltar que varios países han implementado proyectos y políticas basados en la evidencia científica para gestionar la movilidad urbana de manera segura y eficiente (BID, 2020).

Comprender el funcionamiento actual del Área Metropolitana de Asunción (AMA) en términos de movilidad es un primer paso esencial para poder implementar proyectos y políticas públicas eficaces. Los resultados de la *encuesta de movilidad* realizada en el año 2021 serán una herramienta valiosa para sistematizar información precisa acerca de la diversidad de los desplazamientos de las personas; habiendo relevado los motivos, las duraciones, los orígenes, los destinos y los modos de desplazamiento (PNUD et al, 2021).

Bajo este contexto, el presente trabajo busca estudiar y analizar el impacto positivo del uso de tecnologías innovadoras en la gestión del tráfico y el consecuente mejoramiento del nivel de servicio de las vías, creando así corredores e intersecciones seguras, controladas y amigables para sus usuarios, con el objetivo final de mejorar la experiencia de movilidad urbana y la calidad de vida en la ciudad.

Específicamente el estudio busca exponer la conveniencia de la aplicación del software **PTV Vissim**. Probando que, con solamente relevar datos de campo, las problemáticas viales del tráfico interurbano pueden ser analizadas y resueltas sin necesidad de realizar intervenciones apresuradas in-situ. Mediante esto, durante el proceso de toma de decisiones se optimizan tiempo y recursos, tanto humanos como financieros. Según Cunto y Loreiro (2011), el uso de simuladores de tráfico puede permitir adoptar un enfoque más eficaz y proactivo en la gestión de las problemáticas de movilidad, reduciendo la necesidad de largas y costosas observaciones de campo

A través de la simulación computacional y de la posibilidad de generar y evaluar diferentes escenarios para un mismo conjunto de caminos, intersecciones o red, se vuelve más eficiente y asertiva la planificación y ejecución de acciones para atacar los problemas viales, pudiendo así predecir los problemas y las soluciones más adecuadas antes de llevar a cabo una inversión financiera. Para las arcas públicas esto significa una mayor confianza en la calidad de la inversión a ser realizada, evitando la frustración de los técnicos y usuarios.

En ese sentido, el desarrollo de este trabajo de conclusión de curso implica el estudio en profundidad de una intersección conflictiva en la ciudad de Asunción y la búsqueda de estrategias técnicamente apropiadas para la reducción de las problemáticas relacionadas a ella, por medio del software de simulación de tráfico **PTV Vissim**.

La hipótesis del trabajo parte de la premisas de que la intersección en estudio posee un nivel de servicio por debajo de lo aceptable, que el aumento de la flota vehicular agravará aún más las problemáticas relacionadas a la misma, y que la reingeniería de la intersección, por medio de simulación computacional, puede ofrecer una solución conveniente y eficiente.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Examinar y evaluar una intersección vial conflictiva de la ciudad de Asunción, Paraguay, mediante la microsimulación computacional. Asimismo, desarrollar una propuesta técnica de un sistema vial que permita reducir sustancialmente la congestión vehicular y el índice de accidentalidad en la intersección.

El desarrollo de este trabajo de conclusión de curso contempla la yuxtaposición de distintas áreas del conocimiento, como lo son la ingeniería de tránsito y la microsimulación computacional. Esto permite concebir una propuesta de intervención vial eficiente, e ilustrar un modelo de análisis y gestión de tráfico urbano conveniente, ante las crecientes problemáticas relacionadas a la misma.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar, por medio del relevamiento y procesamiento de datos de campo, el estado actual de una intersección conflictiva.
2. Modelar y calibrar, en el software de simulación computacional **PTV Vissim**, la red vial del área de estudio en su formato inalterado.
3. Utilizando **PTV Vissim**, evaluar medidas de desempeño de la intersección, identificando así problemáticas críticas a ser resueltas.
4. Con base en el comportamiento durante la hora pico, modelar, analizar, y justificar técnicamente una propuesta de intervención vial para el área de estudio, que garantice fluidez en el tráfico, reducción de atrasos, seguridad vial y aprovechamiento del espacio público.

1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Para presentar este estudio de manera eficiente, el mismo se organizó de la siguiente manera:

La **sección 1** presenta la introducción, contextualización del problema analizado, la justificativa de estudio, los objetivos y la estructura del proyecto.

En la **sección 2** se presenta la revisión bibliográfica que sustentó este estudio, en la que se exponen conceptos de ingeniería de tráfico, como las características de las vías, el análisis de intersecciones y sus componentes, y también las características generales de la simulación computacional.

La **sección 3** aborda en profundidad el asunto de simulación computacional con el software **PTV Vissim**, para estudios de tráfico.

La **sección 4** presenta de manera sucinta, por medio de un flujograma, la estructura metodológica para la realización del proyecto.

La **sección 5** presenta el estudio de caso desarrollado, conteniendo los datos recopilados, el modelado computacional del escenario base y el escenario de intervención propuesto, y los resultados alcanzados.

La **sección 6** analiza y contrasta, por medio de gráficos, los resultados obtenidos para cada escenario.

La **sección 7** presenta consideraciones finales y una discusión sobre el proceso de ejecución y calidad del estudio presentado.

La **sección 8** contiene documentos analizados, anexos y referencias bibliográficas.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Gran parte de los conceptos, normativas y gráficos presentados en esta sección provienen de manuales creados por diversas instituciones de tráfico brasileiro. Una lista de las descripciones y funciones de cada uno de los órganos que componen el Sistema Nacional de Tránsito Brasileiro se encuentra en [anexo](#).

2.1 VÍAS DE TRÁFICO

Según la Real Academia Española, un camino es “una vía que se construye para transitar”, o, “dirección que ha de seguirse para llegar a algún lugar”. En su sentido más restringido, y más utilizado, el término *camino* se aplica a las vías terrestres de comunicación.

Los caminos, o vías, se diferencian entre sí de acuerdo con la función que cumplen con relación al transporte. Según el Código de Tránsito Brasileiro (CTB), las vías de tránsito son categorizadas en dos grandes grupos, urbanos y rurales, los cuales poseen subclasificaciones.

2.1.1 VÍAS URBANAS

La vía urbana se conceptualiza como “calles, avenidas, callejones o caminos y similares abiertos a la circulación pública, ubicados en el casco urbano, caracterizados principalmente por tener edificaciones construidas a lo largo de su extensión”. Y se dividieron en cuatro tipos de habilitaciones: *vías de tránsito rápido*, *vías arteriales*, *vías colectoras* y *vías vecinales* (DENATRAN, 2008).

VÍA DE TRÁNSITO RÁPIDO (EXPRESA)

Es aquella caracterizada por accesos especiales de libre circulación, sin intersecciones a nivel, sin acceso directo a lotes colindantes y sin paso de peatones a nivel. Una gran característica de las rutas de tránsito rápido es que no tienen semáforos, intersecciones o giros. Su velocidad límite es de 80 km/h.

VÍA ARTERIAL

Es aquella que se caracteriza por intersecciones a nivel, generalmente controladas por semáforos, con accesibilidad a lotes adyacentes y a vías secundarias y vecinales, posibilitando el tránsito entre las regiones de la ciudad. Se caracterizan por conectar un barrio con otro. Su límite de Velocidad es 60 km/h.

VÍA COLECTORA

Es aquella destinada a recoger y distribuir el tráfico que necesita entrar o salir de las vías de tránsito rápido o arteriales, permitiendo el tránsito dentro de las regiones de la ciudad. Se caracterizan por facilitar el movimiento de una región a otra en una ciudad porque están conectadas a vías arteriales y de tránsito rápido. Su velocidad límite es 40 km/h.

VÍAS LOCALES

Es aquella caracterizada por intersecciones a nivel sin semáforos, destinadas únicamente a accesos locales o áreas restringidas. Estos tienen la característica de no tener ningún tipo de conexión, siendo utilizados únicamente por vehículos restringidos o con algún interés, las calles de un condominio cerrado, por ejemplo. Su velocidad límite es de 30 km/h.

Normalmente, los viajeros utilizan diferentes tipos de vías durante sus viajes. Existen relaciones entre los diferentes tipos de vías y su función. Las vías arteriales brindan una mayor movilidad y un mayor control de acceso, mientras que las carreteras locales brindan un alto nivel de acceso a las propiedades adyacentes pero una movilidad limitada. Las carreteras colectoras brindan un equilibrio entre movilidad y acceso a propiedades.

2.1.2 VÍAS RURALES

Los caminos rurales se denominan así porque su recorrido se realiza fuera del medio urbano y por tanto rural. Incluso las carreteras grandes con un gran flujo de vehículos se denominan caminos rurales. Así como los caminos urbanos reciben sus clasificaciones, también los caminos rurales y se pueden clasificar en *carreteras*, siendo aquellas pavimentadas y de tránsito rápido (90-110 km/h), y *caminos*, típicamente siendo no pavimentada, y cuyo límite de velocidad es 60 km/h.

2.2 INTERSECCIONES

Según el DNIT (2005), una intersección se define como el área donde dos o más caminos se encuentran o se cruzan, cubriendo todo el espacio destinado a facilitar el movimiento de los vehículos que circulan por ella. Las intersecciones se clasifican en dos categorías generales según los planos en los que se realizan los movimientos: *intersecciones a nivel* e *intersecciones a diferentes niveles*. También pueden ser clasificadas en función al tipo de control de señalización, como *semaforizada* y *no semaforizada*.

Las intersecciones son elementos de discontinuidad en cualquier red vial y representan situaciones críticas que deben ser tratadas de manera especial. El diseño de las intersecciones debe asegurar la circulación ordenada de los vehículos y mantener el nivel de servicio en la vía, garantizando la seguridad en las zonas donde los flujos vehiculares se ven interferidos.

2.2.1 Tipos de Intersecciones

Según la DNIT (2005), las intersecciones en nivel, aquellas que ocurren en un mismo plano de terreno, pueden ser clasificadas en función a su control de señalización de la siguiente manera:

Intersecciones no semaforizadas: en este tipo de intersecciones prima la regla de prioridad de paso según el sentido de circulación y/o el porte de las vías intersectadas. La prioridad de paso en este tipo de intersecciones puede estar indicada por medio de

señalizaciones horizontales (Figura 5), verticales (Figura 6), o también estar totalmente ausente. Por ejemplo, cuando se ingresa de una Vía Colectora hacia una Vía Arterial, quien transita por la Arterial tiene prioridad de paso, y quien transita por la Colectora debe ceder el paso.



Figura 5: Señalización Horizontal de Control de Tráfico en Pavimento.

Fuente: Campo Grande News (2020).



Figura 6: Señalización Vertical de Control de Tráfico en una Intersección en Paraguay durante Campaña de Educación Vial.

Fuente: Última Hora (2017).

Intersecciones Semaforizadas: estas intersecciones son reguladas mediante dispositivos de control llamados semáforos, los cuales priorizan diferentes movimientos, flujos y modos de transporte utilizando intervalos de tiempo preestablecidos para cada uno de ellos. La configuración semafórica depende del volumen de tráfico, y su objetivo es brindar orden y seguridad a la movilidad urbana.

2.2.2 Puntos de Conflicto

Los puntos de conflicto son cruces de trayectorias que representan una posibilidad de accidente en las intersecciones debido a la intensidad del tráfico (Papazian, 2008).

Según García et al (2015), existen principalmente tres tipos de tipos de conflictos que están relacionados al tipo de maniobra realizada en la intersección:

- a. *Maniobras de Divergencia:* dos trayectorias se separan de una común.
- b. *Maniobras de Convergencia:* dos trayectorias se unen en una común.
- c. *Maniobras de Cruce:* dos trayectorias diferentes buscan ocupar temporalmente el mismo lugar al mismo tiempo.

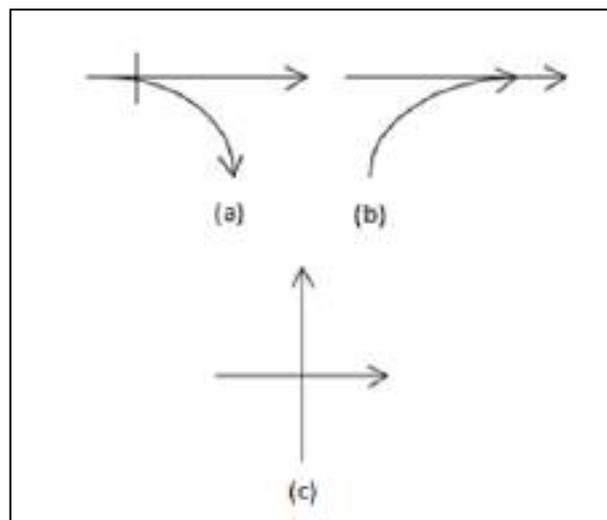


Figura 7: (a) Maniobra de Divergencia, (b) Maniobra de Convergencia, (c) Maniobra de Cruce.

Fuente: García et al (2015).

Según Papazian (2008), los puntos de conflicto dependen directamente de:

- Número de vías involucradas en la intersección.
- Sentido de circulación vehicular.
- Número de movimientos de giro permitidos.
- Tipo de control de tránsito

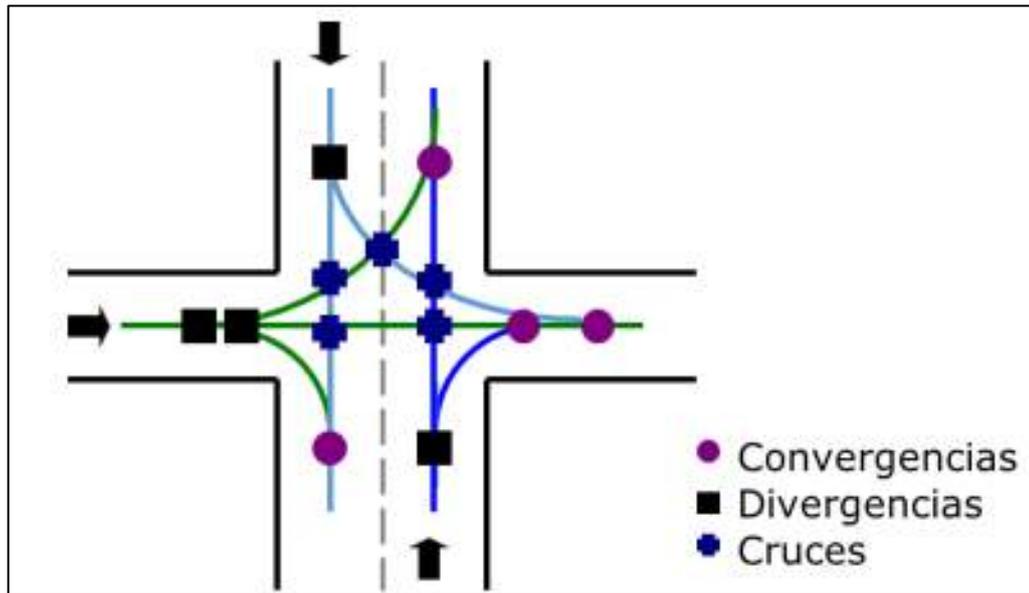


Figura 8: Diferentes tipos de conflicto en una intersección vial.

Fuente: Papazian (2008).

De entre los causantes de la existencia de puntos de conflicto predomina el número de vías intersectadas, puesto que cuantas más vías están involucradas, más son los puntos de conflictos generados, de la misma manera generan un impacto significativo el sentido de circulación en las vías involucradas.

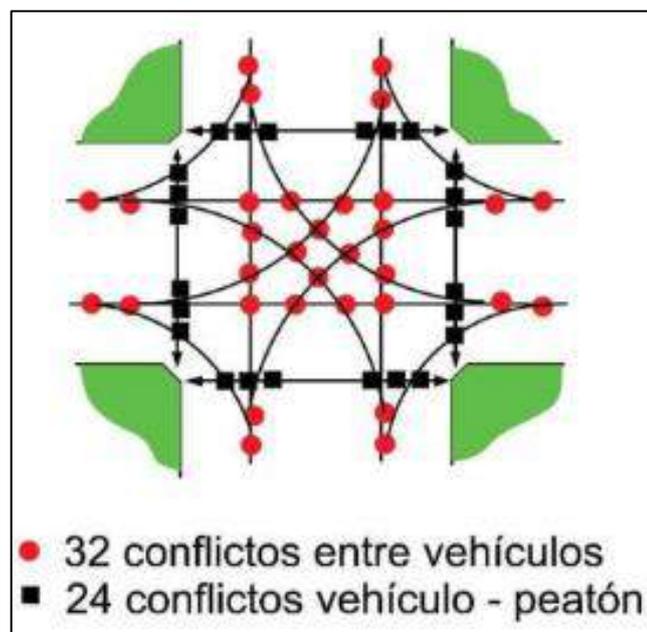


Figura 9: Puntos de Conflictos entre vehículos y peatones en una intersección de 4 ramas.

Fuente: Papazian (2008).

Según la Figura 9, podemos evidenciar claramente lo expuesto en el párrafo anterior, donde, en el caso más frecuente en ciudades, es decir, intersecciones de 4 vías a nivel, se generan 32 puntos de conflictos vehiculares, y 24 puntos de conflictos peatonales.

Según García et al (2012), las decisiones de conducción, y la consecuente manera de conducir son factores importantes que influyen en la existencia de nuevos puntos de conflicto en una intersección, puesto que, si el conductor realiza movimientos inesperados, como cambiar de carril o girar a la izquierda o derecha en carriles que no están destinados para ese propósito, se generan nuevas trayectorias no previstas que aumentan el número de conflictos, y consecuentemente el número de posibles accidentes.

En intersecciones no semaforizadas, se observa una mayor frecuencia de rutas no previstas debido a que cada conductor debe determinar el momento preciso y seguro para ejecutar el movimiento deseado (Depiante, 2011). Los conductores dependen en gran medida de su percepción del tiempo y el espacio para tomar decisiones informadas. En particular, deben determinar cuándo realizar su movimiento y evaluar si es seguro hacerlo en función de su entorno, lo que implica una mayor complejidad y responsabilidad por parte del conductor.

Intuitivamente se considera que una de las estrategias más efectivas para mejorar la seguridad en las intersecciones es la reducción o separación de los puntos de conflicto, tal como lo sugiere Lu (2013). En este sentido, la *semaforización* es una solución comúnmente utilizada para mitigar y solucionar diferentes controversias que pueden surgir en un cruce direccional. Las intersecciones semaforizadas logran separar los movimientos de cruce en el tiempo, utilizando ciclos de espera para la luz verde, tal como lo sugiere Ding (2010). De esta manera, se logra reducir la probabilidad de conflictos entre vehículos y se mejora la seguridad en la intersección.

En su estudio sobre la seguridad en intersecciones en la ciudad de Harbin, China, Yong-Gang Wang realizó una comparación entre los accidentes registrados en intersecciones que contaban semaforizadas y no semaforizadas. El autor sostiene que el semáforo, como señal de tránsito, tiene mayor importancia que otras, ya que es el principal encargado de organizar el flujo vehicular y mejorar las condiciones de seguridad en una intersección. A partir de los resultados obtenidos en su análisis, Wang concluyó que la implementación de semáforos y el monitoreo del tráfico son medidas efectivas para disminuir el porcentaje de accidentes en una intersección (Wang, 2011).

2.3 PROYECTO DE INTERSECCIONES

Al estudiar y diseñar una intersección, se deben tener en cuenta una serie de restricciones, que incluyen elementos de tráfico, factores físicos, económicos y ambientales. La adopción de un tipo de intersección dependerá principalmente de la correlación existente entre la topografía del terreno, los volúmenes de tránsito y su composición, la capacidad vial, la seguridad y los costos de implementación y operación. porque están íntimamente ligados a los elementos del proyecto, estos factores y su interdependencia deben conocerse antes de elaborar el proyecto.

Seguidamente son expuestos los datos básicos que según DNIT (2005) deben ser llevados en consideración a la hora de proyectar una intersección:

2.3.1 Datos Funcionales

El primer factor por considerar es la clasificación funcional de las vías de intersección, ya que el proyecto debe ser consistente con sus características funcionales: clasificación en una determinada red, tipo de control de acceso, velocidades específicas y prioridades de paso.

2.3.2 Datos Físicos

La representación, en una escala conveniente, de la topografía del área afectada por el proyecto es fundamental para su elaboración. Estos datos se obtendrán mediante fotogrametría aérea, levantamientos topográficos clásicos, con o sin el apoyo de modernos equipos electrónicos y sistemas de procesamiento de datos.

Los planos deben incluir todos los datos que puedan afectar o limitar las soluciones a estudiar, tales como: edificaciones, accidentes geográficos, servicios existentes (redes, líneas de transmisión, etc.) y otros. La escala más común es 1/500, aunque para intersecciones de dos niveles puede ser conveniente una escala de 1/1000. En las intersecciones urbanas, se puede requerir una escala de 1/200.

2.3.3 Datos de Tráfico

TRÁFICO DE VEHÍCULOS

La definición de la solución a adoptar para una determinada intersección y el dimensionamiento de esta dependerá necesariamente del volumen y características del tráfico que circula o circulará por la misma.

Los datos de tráfico deberán incluir los volúmenes de tráfico, tanto el *Volumen Medio Diario (VMD)* como el *Volumen de Hora Pico (Vhp)*. Estos datos deben estar representados en diagramas de flujo que indiquen las diferentes corrientes de vehículos. Los vehículos pueden ser clasificados de según su porte y función, típicamente en: automóviles de pasajeros, motocicletas, autobuses y vehículos de carga.

De manera general, según la **DNIT (2006)**, se engloban todos los medios de transporte que circulan por una vía, a través de un proceso de equivalencia entre los mismos, en una unidad llamada *Unidad de Carros de Paseo* (UCP/hora), y los resultados del conteo presentan por medio de un flujograma de tráfico, como se observa en la Figura 10.

El relevamiento de datos de tráfico será abordado con mayor profundidad en la sección [Conteo Volumétrico](#)

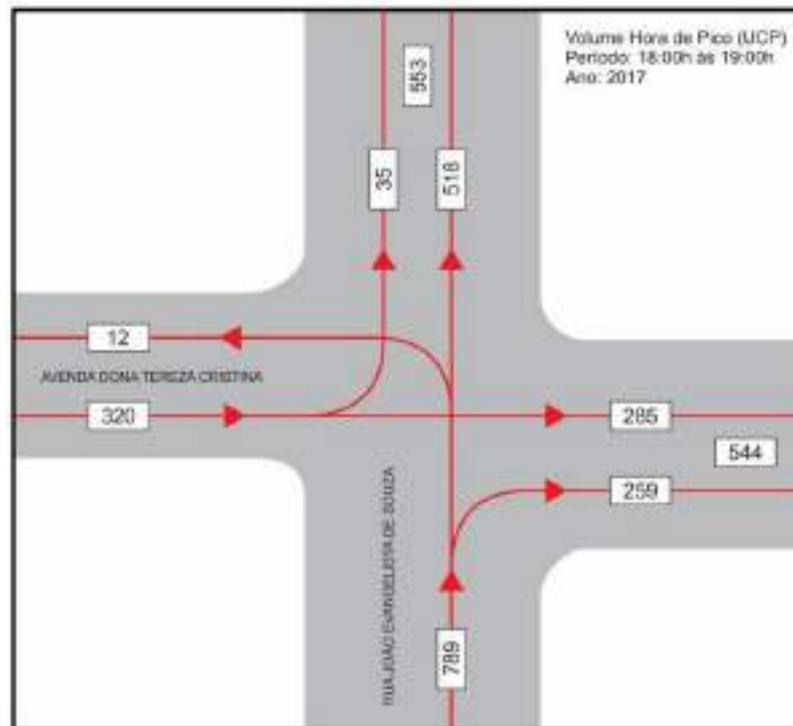


Figura 10. Modelo de Flujograma de Tráfico.

Fuente: DNIT (2006)

TRÁFICO DE PEATONES

En los cruces en los que la influencia de los peatones pueda contribuir a generar problemas de aforo y seguridad, es necesario registrar sus movimientos, con vistas a un posterior análisis de la necesidad de construir pasarelas o, eventualmente, a la implantación de una fase especial para peatones en el ciclo semafórico.

La ubicación de los puntos críticos o peligrosos se establecerá con base en la información de las autoridades locales y las observaciones realizadas durante las inspecciones de campo.

En general, los conteos de peatones deben realizarse durante las horas pico de la intersección. Deben identificarse tanto los cruces en los lugares apropiados como los incorrectos, y deben anotarse los volúmenes peatonales en intervalos de 15 (quince) minutos.

2.3.4 Datos de Accidentes

En el caso de mejoras a intersecciones existentes, los informes de accidentes que contienen registros completos y análisis de sus causas son de gran importancia. En ausencia

de estos informes, se debe realizar un levantamiento de las condiciones de operación de la intersección para determinar las causas de los accidentes.

Un método sugerido es observar posibles conflictos de tránsito en el lugar y juzgar si existe o no la seguridad adecuada en las intersecciones identificadas como “puntos críticos” en conversaciones preliminares con las autoridades locales. En estos puntos de conflicto, los conductores realizan acciones evasivas para evitar colisiones: frenadas bruscas, desvíos bruscos e incluso desobedecer las señales. El método implica la observación sistemática de las condiciones operativas de cada intersección. La información resultante es bastante esclarecedora y, a menudo, se pueden determinar las causas originales, no reveladas en los registros oficiales.

2.3.5 Datos Económicos

Otro aspecto importante es el factor económico, representado por el costo de implementación del cruce: pudiendo abarcar expropiación más construcción.

El costo de construcción varía mucho según el tipo de solución a adoptar: a un nivel, a diferentes niveles. La insuficiencia del derecho de vía disponible, el alto costo de los terrenos y construcciones adyacentes a las vías, en ocasiones implican severas restricciones a la ejecución de un proyecto.

Las diversas alternativas de proyectos técnicamente viables deben tener en cuenta todos estos factores.

2.4 CARACTERÍSTICAS DEL TRÁFICO VEHICULAR

El volumen, la velocidad y la densidad son tres características fundamentales de los aspectos dinámicos del tráfico. El análisis de estos tres elementos permite la valoración global de la fluidez del movimiento de vehículos (DNIT, 2006).

2.4.1 Volumen

El Volumen de Tránsito (o Flujo de Tránsito) se define como el número de vehículos que pasan por una sección de una carretera, o un carril dado, durante una unidad de tiempo. Suele expresarse en *vehículos/día (vpd)* o *vehículos/hora (vph)*. (DNIT, 2006).

VOLUMEN MEDIO DIARIO

El volumen medio de vehículos que circulan durante 24 horas por un tramo de vía se denomina “Volumen Medio Diario” (VMD). Se computa por un período de tiempo representativo, que, salvo indicación en contrario, es de un año. Para estos casos, la unidad de medida es de Vehículos por Día (*vpd*) (DNIT, 2006).

Este volumen, que mejor representa el uso o servicio que brinda la vía, se utiliza para indicar la necesidad de nuevas vías o mejoras a las existentes, estimar los beneficios

esperados de una obra vial, determinar las prioridades de inversión, calcular la siniestralidad, prever los ingresos de las cabinas de peaje, etc.

Vías con características geométricas idénticas pueden tener capacidades diferentes, ya que también están influenciadas por la composición del tráfico que las utiliza. Para los estudios de capacidad, puede ser conveniente representar cada tipo de vehículo en “*Unidades de Carro de Paseo*”, abreviado como UCP, es decir, un número equivalente de automóviles de pasajeros que tienen los mismos efectos sobre la capacidad de la carretera que el vehículo en cuestión. Cuando el volumen esté representado por la suma de vehículos, cualquiera que sea su categoría, se expresará en “*Unidades de Tránsito Mixto*”, abreviadas por la sigla UTM (DNIT, 2006).

VOLUMEN HORARIO

Para analizar las variaciones en el flujo de tráfico durante el día, se adopta la hora como unidad de tiempo, llegando al concepto de Volumen Horario (**VH**): número total de vehículos que circulan en una hora determinada. El volumen adoptado para dimensionar los detalles geométricos de las vías e intersecciones, determinar los niveles de servicio, planificar la operación vial, la señalización y la regulación del tránsito se denomina Volumen Horario del Proyecto (**VHP**) (DNIT, 2006).

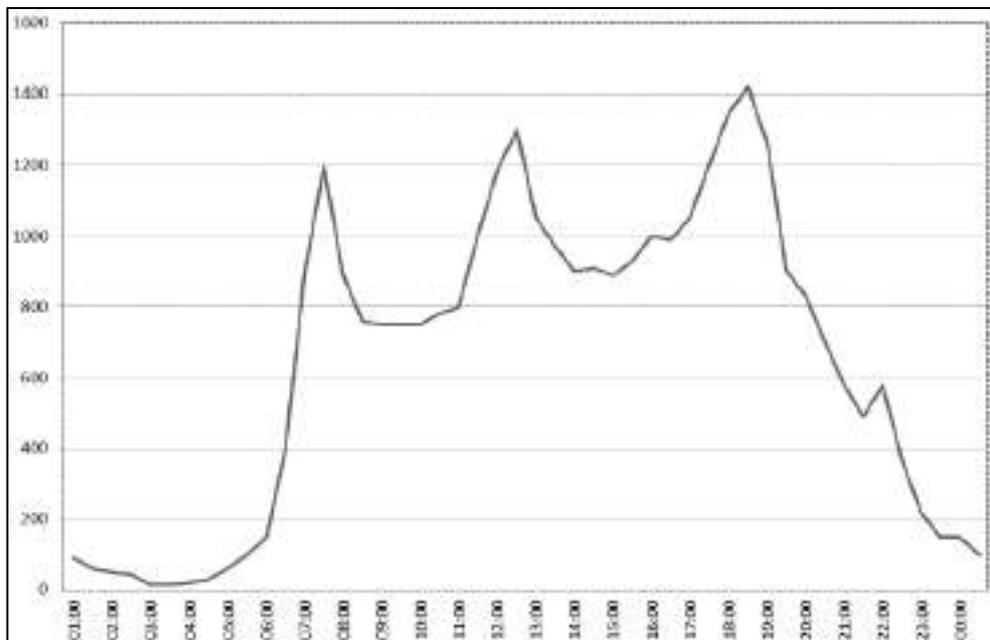


Figura 11: Gráfico de Variación Horaria del Volumen de Tráfico en una vía.

(donde las abscisas representan las horas del día y las ordenadas representan el volumen en vehículos/hora).

Fuente: CONTRAN (2014).

COMPOSICIÓN DE TRÁFICO

El flujo de tráfico se compone de vehículos que difieren en tamaño, peso y velocidad. Según DNIT (2006), el conocimiento de la composición de los volúmenes es fundamental por las siguientes razones:

- Los efectos que los vehículos tienen entre sí dependen de sus características. La composición de la corriente de vehículos que pasan por una carretera influye en su capacidad.
- Los porcentajes de vehículos grandes determinan las características geométricas que deben tener las vías, y sus pesos las características estructurales.
- Los recursos que se pueden obtener de los usuarios de una vía dependen, entre otros factores, de la composición de su tráfico.

VARIACIÓN DE VOLÚMENES DE TRÁFICO

Los volúmenes por hora varían a lo largo del día, con picos pronunciados llamados picos. Comprender estas variaciones es de fundamental importancia, ya que es en las horas punta donde necesariamente se producirán los eventos más relevantes. Al ampliar los conteos de unas pocas horas a un día completo, la precisión de la estimación siempre dependerá del conocimiento de patrones de fluctuación de volumen.

Las horas pico, que contienen los mayores volúmenes de vehículos en una carretera en un día determinado, varían de un lugar a otro, pero tienden a permanecer estables en el mismo lugar el mismo día de la semana. Si bien la hora pico en un lugar determinado tiende a permanecer estable, su volumen varía dentro de la semana y durante todo el año. (DNIT, 2006).

De acuerdo con CONTRAN (2014), la *Tasa de Flujo* de un movimiento es el número de vehículos proyectados para un período de una hora a partir de los volúmenes medidos en un determinado tramo de vía, durante intervalos de tiempo inferiores a una hora.

El volumen de vehículos que transitan por un tramo de vía no es uniforme a lo largo del tiempo. La comparación de conteos de cuatro períodos consecutivos de quince minutos muestra que son diferentes entre sí. Por lo tanto, según Hoel et al (2011), se define la *Tasa de Flujo Máxima* (v) como siendo:

$$v = v_i * 4$$

Ecuación 1: Tasa de Flujo Máxima

Donde:

v = Tasa de Flujo Máxima

v_i = Volumen del Periodo de 15 minutos con mayor flujo de tráfico dentro de la hora pico

Esta variación lleva al establecimiento del *Factor de Hora Pico (FHP)*, que mide precisamente esta fluctuación y muestra el grado de uniformidad del flujo.

$$FHP = \frac{VH}{v}$$

Ecuación 2: Factor de Hora Pico

Donde:

FHP = Factor de Hora Pico

VH = Volumen Total de Hora Pico

v = Tasa de Flujo Máxima

El **FHP** varía teóricamente entre 0,25 (flujo totalmente concentrado en uno de los períodos de 15 minutos) y 1,00 (flujo completamente uniforme), ambos casos prácticamente imposibles de verificar. Los casos más comunes son **FHP** en el rango de 0,75 a 0,90. Los valores de FHP en áreas urbanas generalmente están en el rango de 0.80 a 0.98. Valores superiores a 0,95 son indicativos de grandes volúmenes de tráfico, en ocasiones con limitaciones de capacidad en horas punta (DNIT, 2006).

2.4.2 Velocidad

Según DNIT (2006), la velocidad es, entre las características esenciales del tráfico, una de las más complejas de definir. Adopta diversas formas, según el tipo de tiempo que se utilice y la base espacial sobre la que se calcule. Los principales conceptos de velocidad utilizados son:

- *Velocidad*: es la relación entre el espacio recorrido por un vehículo (d) y el tiempo empleado en recorrerlo (t). Si llamamos a V la velocidad, entonces $V = d/t$. En los estudios de tráfico, la velocidad suele determinarse en *km/h*.

Ecuación 3: Velocidad

- *Velocidad Instantánea*: es la velocidad de un vehículo en un instante dado, correspondiente a un tramo cuya longitud tiende a cero.
- *Velocidad Puntual*: es la velocidad instantánea de un vehículo cuando pasa por un determinado punto o tramo de la vía.
- *Velocidad Media en el Tiempo*: es la media aritmética de las velocidades puntuales de todos los vehículos que transitan por un determinado punto o tramo de la vía, durante intervalos finitos de tiempo, aunque sean muy pequeños.
- *Velocidad de Flujo Libre*: es la velocidad promedio de los vehículos en una vía determinada, cuando existen bajos volúmenes de tránsito y no existen

restricciones impuestas a sus velocidades, ni por interacción vehicular ni por regulación de tránsito. Por tanto, refleja la tendencia del conductor a conducir a la velocidad deseada.

- *Velocidad de Proyecto*: es la velocidad seleccionada para efectos de diseño, de la cual se derivan los valores mínimos de ciertas características físicas directamente vinculadas a la operación y movimiento de los vehículos. Normalmente es la velocidad máxima a la que puede circular con seguridad un tramo de carretera, cuando el vehículo está sujeto únicamente a las limitaciones impuestas por las características geométricas.
- *Velocidad Media de Viaje*: es la velocidad en un tramo de una vía, determinada por la relación entre la longitud del tramo y el tiempo medio empleado en recorrerlo, incluidos los tiempos en los que, eventualmente, los vehículos están detenidos. Si se observan los tiempos de viaje $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ (en horas) para n vehículos que cubren un segmento L , la velocidad promedio de viaje se puede obtener mediante la expresión:

$$V_{mv} = \frac{L}{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n t_i}$$

Ecuación 4: Velocidad Media de Viaje

Donde:

V_{mv} = Velocidad Media de Viaje (km/h)

L = Longitud del Trecho (km)

t_i = Tiempo de Viaje del Vehículo

n = Número de Vehículos Observados

2.4.3 Densidad

Según **DNIT (2006)**, la densidad se define como el número de vehículos por unidad de longitud de carretera. Se puede medir experimentalmente, o por la siguiente relación, para flujos no saturados:

$$D_t = \frac{F_{mt}}{V_{mt}}$$

Ecuación 5: Densidad Vehicular

Donde:

D_t = Densidad (Vehículos/km)

F_{mt} = Flujo Medio en el Trecho (Vehículos/h)

V_{mt} = Velocidad Media en el Trecho (km/h)

La densidad es un parámetro crítico de los flujos continuos, porque caracteriza la proximidad de los vehículos, reflejando el grado de libertad de maniobra del tráfico.

Los estudios de capacidad de intersecciones, intercambios, terminales y otros análisis de las características de las carreteras exigen datos sobre el espacio y el intervalo de tiempo entre vehículos. Estas dos cantidades describen la disposición longitudinal de los vehículos en el flujo de tráfico de una carretera.

La *Separación* es la distancia entre dos vehículos sucesivos, medida entre puntos de referencia comunes.

Se denomina *Intervalo* o "*Headway*" al tiempo transcurrido entre el paso de dos vehículos sucesivos por un punto dado.

Si bien el volumen es la característica más significativa del tráfico y proporciona una medida clara del nivel de congestión de una carretera, el espacio y la distancia afectan a los conductores individuales, ya que indican libertad de movimiento y seguridad relativa, lo que influye en la elección de velocidades y distancias entre vehículos.

Existen las siguientes relaciones que involucran los valores mencionados:

$$D_t = \frac{1000}{e_{mt}}$$

Ecuación 6: Densidad Vehicular en función a la separación media

$$h_{mt} = \frac{e_{mt}}{V_{mt}}$$

Ecuación 7: Headway Medio

$$F_{mt} = \frac{3600}{h_{mt}}$$

Ecuación 8: Flujo Medio

Donde:

V_{mt} = Velocidad Media (m/s)

F_{mt} = Flujo Medio (vehículos/h)

D_t = Densidad (vehículos/km)

e_{mt} = Separación Media (m/vehículo)

h_{mt} = *headway* medio (s/vehículo)

Cabe señalar que, en el caso de tráfico mixto, puede ser necesario considerar por separado los diferentes tipos de vehículos al determinar su separación y distancia.

2.4.4 Relaciones de Volumen, Velocidad y Densidad

Esta ecuación establece que el flujo o volumen de tráfico es igual al producto de la velocidad y la densidad.

$$V = F_{mt} * D_t$$

Ecuación 9: Relación entre
Velocidad, Flujo Medio y Densidad

Donde:

V_{mt} = Velocidad Media (km/s)

F_{mt} = Flujo Medio (vehículos/h)

D_t = Densidad (vehículos/km)

Por lo tanto, si un tramo de carretera de 1 km contiene 15 vehículos (es decir, $D_t = 15$ vehículos/km) y la velocidad media (V_{mt}) de los 15 vehículos es de 60 km/h, después de una hora habrán pasado 900 vehículos (60×15). El valor del flujo (V) o volumen de tráfico en este caso sería igual a 900 vehículos/h.

Siguiendo esta lógica de relacionamientos, se puede afirmar que:

- Partiendo de la velocidad de flujo libre (V_f), aumentando el valor del flujo, se reduce la velocidad promedio hasta llegar a un punto de densidad óptima (D_o), que corresponde al flujo máximo que puede transportar la vía, denominado Capacidad. A partir de este punto, la entrada de más vehículos en la corriente provoca turbulencias y disminuye tanto la velocidad como el volumen.
- La densidad de una vía aumenta al disminuir la velocidad. Una vez que se alcanza la densidad óptima (D_o), la densidad continúa aumentando, mientras que la velocidad disminuye.
- Un aumento de densidad conduce a un aumento de volumen, hasta alcanzar la densidad óptima, a partir de la cual el flujo disminuye con un aumento de densidad. La densidad óptima varía con el tipo de camino.

2.5 CONTEO VOLUMÉTRICO

Según el DNIT (2006), los Conteos Volumétricos tienen como objetivo determinar la cantidad, dirección y composición del flujo de vehículos que transitan por uno o más puntos

seleccionados del sistema vial, en una determinada unidad de tiempo. Esta información se utilizará en el análisis de capacidad, en la evaluación de las causas de la congestión y los altos índices de accidentes, en el diseño de pavimentos y en diversos proyectos de tráfico.

Existen dos lugares básicos para realizar los conteos: en los tramos entre intersecciones y en las intersecciones. Los conteos entre intersecciones tienen como objetivo identificar los flujos de un camino determinado y los conteos en las intersecciones para levantar los flujos de los caminos que se cruzan y sus ramales de conexión (DNIT, 2006).

Específicamente, los conteos volumétricos se pueden utilizar para verificar la demanda a la cual es sometida una intersección. Los datos relevados permiten saber en detalle cuántos vehículos transitan, la composición del flujo, y los movimientos que se realizan. Los conteos también se utilizan para comparar la demanda encontrada con la capacidad que ofrece la vía y para evaluar el nivel de servicio de esta (Federal Highway Administration, 2022).

Según DNIT (2006), los conteos volumétricos para estudios en zonas rurales se clasifican en:

- CONTEOS GLOBALES

Son aquellos en los que se registra el número de vehículos que circulan por un tramo de vía, independientemente de su sentido, agrupándolos generalmente por sus distintas clases. Se utilizan para calcular volúmenes diarios, preparar mapas de flujo y determinar tendencias de tráfico.

- CONTEOS DIRECCIONALES

Son aquellos en los que se registra el número de vehículos por sentido de circulación y se utilizan para cálculos de aforo, determinación de intervalos de semáforos, justificación de controles de tráfico, estudios de siniestralidad, previsión de carriles adicionales en rampas ascendentes, etc.

- CONTEOS DE CLASE

Estos recuentos registran los volúmenes de los distintos tipos o clases de vehículos. Se utilizan para dimensionamiento estructural y diseño geométrico de carreteras e intersecciones, cálculo de capacidad, cálculo de beneficios para el usuario y determinación de factores de corrección para conteos mecánicos.

2.5.1 Conteo Manual

A diferencia de los conteos automáticos, los conteos manuales son realizados por investigadores, con la ayuda de fichas de control y contadores manuales. Para conteos en vías urbanas, es común adoptar un criterio de agrupación de vehículos basado en características similares de operación, como Carros de Paseo (P), Ómnibus (O) y Vehículos de Carga (C) (DNIT, 2006).

La Figura 12 muestra un modelo sugerido por DNIT (2016) para conteo de tráfico en intersecciones. Es utilizada una ficha para cada rama de la intersección estudiada, donde los vehículos pueden girar a la derecha, izquierda, o avanzar en línea recta.

CONTAGEM EM INTERSEÇÕES										
A FOLHA	B POSTO	C TEMPO	D DIA DA SEMANA			E DATA	F ESQUEMA DE LOCALIZAÇÃO			G PESQUISADOR
Nº	Nº	<input type="checkbox"/> SOL <input type="checkbox"/> CHUVA <input type="checkbox"/> NUBLADO	<input type="checkbox"/> DOM <input type="checkbox"/> SEG <input type="checkbox"/> TER <input type="checkbox"/> QUA	<input type="checkbox"/> QUI <input type="checkbox"/> SEX <input type="checkbox"/> SAB	/ /					
HORA	DE SENTIDO PARA			DE SENTIDO PARA			DE SENTIDO PARA			
	MOVIMENTO			MOVIMENTO			MOVIMENTO			
	AUTO	ÔNIBUS	CAMINHÃO	AUTO	ÔNIBUS	CAMINHÃO	AUTO	ÔNIBUS	CAMINHÃO	
DE										
ATÉ										
DE										
ATÉ										
DE										
ATÉ										

Figura 12: Modelo de Ficha de Conteo Volumétrico.

Fuente: DNIT (2016).

El proceso de recolección manual de datos consiste en el uso de contadores mecánicos manuales adosados a una plancheta portapapeles, que también contiene el formulario para el apunte de los datos observados.

La Figura 32 expone un modelo de Ficha de Conteo ajustado a conveniencia de los investigadores, el cual fue utilizado en un estudio de tráfico para la ciudad de Asunción, Paraguay, en una intersección, con auxilio de contadores manuales. En el mismo donde se visualiza la franja horaria de levantamiento de datos, divididos en periodos cuatro periodos de 15 minutos por hora, con una duración total de dos horas. Se visualiza también la clasificación de vehículos contabilizados, y el tipo de movimiento realizado por los mismos.



Figura 13: Contador Manual y Ficha de Conteo Volumétrico.

Fuente: Autor.

Por lo general, los volúmenes se recopilan por tipo de vehículo (rever la Figura 11). Según DNIT (2016), para un procesamiento de datos facilitado, conviene utilizar factores de equivalencia, agrupando así todos los medios de transporte en una misma unidad equivalente, *Unidades de Carro de Paseo (UCP)*.

Seguidamente, se expone un modelo presentado por DNIT (2006) para resumir el conteo de flujo de tráfico por hora, en una intersección de 4 ramas. El mismo es elaborado en base a 4 de Fichas de Conteo como la expuesta en la Figura 12. En la ficha mostrada en la Figura 14 se suma el volumen de tráfico para cada intervalo horario de tiempo, para una cada posible movimiento (Izquierda, Derecha, Recto), agrupando los vehículos en *UCP*. Ver equivalencias de *UCP* en anexo.

SUMARIO DOS FLUXOS - UCP																					
Local: BR-101 Interseção do km 114,8					Data: 20-04-2005					Condições do Tempo: Bom											
Rodovia: BR-101					Rodovia: BR-101					Rodovia: Cidade A					Rodovia: Cidade B						
Sentido: Norte					Sentido: Sul					Sentido: Leste					Sentido: Oeste						
Intervalo (h-h)	E	F	D	Total	E	F	D	Total	E	F	D	Total	E	F	D	Total	T. Geral	Intervalo (h-h)	T. Geral	MAX	300h
06:00 - 06:15	21	128	21	170	31	164	34	229	11	121	48	181	18	126	22	166	772	06:00 - 06:00	2624		
06:15 - 06:30	15	118	26	159	35	248	38	321	11	75	32	120	15	106	39	145	727	06:15 - 06:15	2888		
06:30 - 06:45	4	98	16	117	38	254	21	313	12	112	40	164	14	115	21	150	720	06:30 - 06:30	2680		
06:45 - 09:00	15	101	22	138	38	213	38	287	8	96	50	154	11	106	31	148	725	06:45 - 09:00	2970		
09:00 - 09:15	13	110	17	138	36	219	36	294	8	87	34	129	10	106	36	145	706	09:00 - 09:00	2990		
09:15 - 09:30	11	109	20	140	41	204	38	284	10	110	58	178	9	122	18	149	749	09:15 - 09:15	3002		
09:30 - 09:45	22	130	22	174	39	188	38	265	13	124	48	185	21	127	34	177	750	09:30 - 09:30	2996		
09:45 - 10:00	16	120	27	163	24	252	29	305	13	82	31	126	16	109	24	151	745	09:45 - 10:00	2930		
10:00 - 10:15	7	98	18	121	31	208	28	275	14	115	38	168	17	116	23	156	715	10:00 - 10:00	2952		
10:15 - 10:30	16	163	24	203	38	217	39	294	10	99	49	158	14	107	32	154	743	10:15 - 10:15	3021		
10:30 - 10:45	12	112	18	142	38	223	40	298	10	90	32	132	13	107	31	151	724	10:30 - 10:30	2985		
10:45 - 11:00	12	111	21	144	41	208	39	288	12	113	55	180	12	123	26	155	757	10:45 - 11:00	2995		
11:00 - 11:15	15	115	18	148	21	180	38	243	17	122	54	196	10	141	27	178	787	11:00 - 11:00	3021		
11:15 - 11:30	13	106	14	133	33	218	37	290	7	84	53	144	9	105	17	131	707	11:15 - 11:15	2985		
11:30 - 11:45	12	108	21	139	41	223	34	278	9	109	47	165	8	121	23	152	734	11:30 - 11:30	2985		
11:45 - 12:00	21	124	34	179	38	187	38	263	12	123	38	165	20	124	28	168	760	11:45 - 12:00	2988		
FLUXOS DA HORA DE PICO																					
Intervalo (h-h)	E	F	D	Total	E	F	D	Total	E	F	D	Total	E	F	D	Total	T. Geral				
10:15 - 11:05	55	461	75	591	136	326	154	616	45	424	156	625	45	476	111	636	3021				

Figura 14: Ficha de Resumen de Conteo Volumétrico para Carreteras.

(donde E significa giro hacia la Izquierda, F significa movimiento en línea recta, y D significa giro a la derecha)

Fuente: DNIT (2006)

La Figura 14 permite la elaboración de un Flujograma de Movimientos para evidenciar, de manera más intuitiva, la cuantificación de todos los movimientos involucrados en una intersección, como se muestra en la Figura 15:

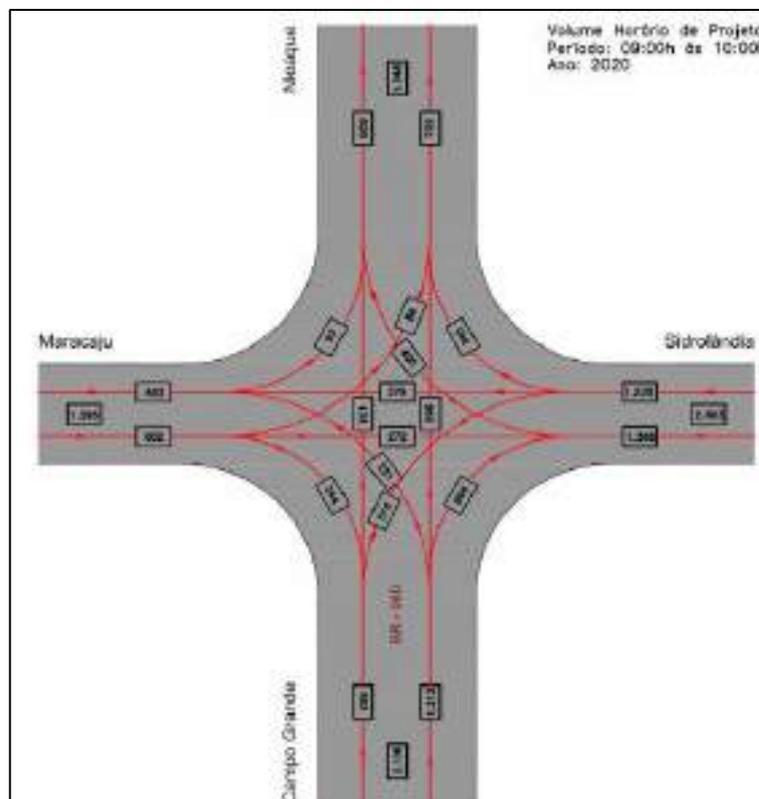


Figura 15: Modelo de Flujograma de Tráfico en UCP.

Fuente: DNIT (2006).

Según la DNIT (2016), los horarios más comunes para la búsqueda son aquellos en los que se presentan los mayores flujos, denominados “horas punta”, ya que es en estos horarios cuando el cruce se encuentra en máxima demanda. La encuesta debe cubrir por lo menos estos tiempos, cuidando de recolectar datos en un período suficiente para visualizar la ocurrencia del pico. Si no se dispone de datos, se debe realizar un recuento preliminar para este fin. Habitualmente, conocer de antemano el tiempo aproximado del pico, contar de dos a cuatro horas en su entorno es suficiente para caracterizar y conocer el volumen del pico. Este relevamiento debe realizarse en los periodos de mañana y tarde, obteniendo los denominados “*pico de la mañana*” y “*pico de la tarde*”. Si hay interés y recursos, se pueden obtener flujos propios de otros cronogramas; pico de almuerzo, por ejemplo, si lo hay, o períodos de menor actividad o incluso todo el día.

El procesamiento de los datos de conteo volumétrico permite evaluar el desempeño de la intersección mediante la escala de Niveles de Servicio. Dada la conflictiva naturaleza de una intersección y su significativo impacto en el flujo libre en carreteras, surge la dificultad de cumplir con altos niveles de servicio sin costos excesivos de proyecto. Por tanto, en proyectos de intersecciones, se debe considerar, para cualquier tipo de vía, los niveles de servicio **B** y **C** como criterio deseado, y el nivel **D** como necesario (DNIT, 2016).

La adopción de los niveles de servicio deseados puede depender en algunos casos de estudios de factibilidad técnica y económica. Se observa frecuentemente que las características intrínsecas de una intersección como volúmenes de tráfico excesivos y espacio físico limitado, y consecuentemente los altos costos que implicaría un proyecto, imposibilitan la adopción de un nivel de servicio deseado. Este es un problema que debe ser analizado caso por caso, y resulta imposible crear reglas generales para su solución (DNIT, 2016).

Seguidamente se aborda en profundidad el concepto de Nivel de Servicio y sus implicancias.

2.6 NIVEL DE SERVICIO

En términos generales, clasificar la calidad de un servicio recibido puede ser una tarea compleja dada la naturaleza subjetiva del concepto. Cada región, cultura y persona tiene sus propios estándares y conceptos sobre los cuales definen calidad. Por tanto, en términos de ingeniería de tránsito, cuando se trata de la calidad del servicio ofrecido por carreteras, es necesario establecer criterios técnicos y objetivos para homogeneizar el concepto y adaptarlo a escenarios de alta y/o baja eficiencia.

Surge así una pregunta relacionada: ¿cuál es el nivel de desempeño de un sistema vial en diversas condiciones de funcionamiento? O, en otras palabras, ¿qué tan bueno es el funcionamiento de la instalación de tráfico?

El análisis del nivel de servicio intenta responder a esta pregunta, lo cual se da esencialmente mediante un análisis cualitativo. Se anticipa que las capacidades y el nivel de servicios están estrechamente relacionados con el análisis de calidad de una instalación de tráfico.

De esta manera es importante abordar el concepto de **capacidad** de una instalación de transporte, que se define como el número máximo de vehículos, pasajeros o similares, por unidad de tiempo, que pueden acomodarse en determinadas condiciones con una expectativa razonable de ocurrencia. La capacidad es independiente de la demanda. Habla de la cantidad física de vehículos y pasajeros que puede permitirse una carretera. No depende del número total de vehículos que demandan el servicio. (Mathew, 2019).

Por otro lado, la capacidad depende de las condiciones del tráfico y del diseño geométrico de la vía, entre otros factores. Por ejemplo, una vía con curvas tiene menor capacidad en comparación con una vía recta. La capacidad se expresa en términos de unidades de algo específico (automóvil, personas, etc.), por lo que también depende de la composición del tráfico (Mathew & Rao, 2007).

Según Mathew (2019), la medida de la capacidad depende de las siguientes condiciones de funcionamiento de una vía:

Primeramente, de las **condiciones del tráfico**, es decir el volumen y composición de tráfico, número de giros, movimientos, entre otros.

El segundo factor son las **condiciones de la vía** e incluye características geométricas como ancho de carril, ancho de banquina, y pendientes tanto horizontal como vertical.

El tercer factor son las **condiciones de control**, como los tiempos de los semáforos, reglas de prioridad de paso, entre otros.

El **Highway Capacity Manual** (HCM) (2010) define el concepto de calidad como el buen funcionamiento de una vía o servicio desde la perspectiva del usuario. El Nivel de Servicio es una estratificación cuantitativa de una medida de desempeño o medida que evalúa la eficiencia de un servicio.

Un término estrechamente relacionado con la capacidad y que a menudo se confunde con él es el volumen del servicio. Cuando la capacidad da una medida cuantitativa del tráfico, el nivel de servicio o LOS intenta dar una medida cualitativa. Un volumen de servicio es el número máximo de vehículos, pasajeros o similares, que puede acomodar una instalación o sistema dado en condiciones dadas en un nivel de servicio dado (Mathew & Rao, 2007).

Para una vía o instalación determinada, la capacidad podría ser constante. Pero el flujo real será diferente para diferentes días y diferentes momentos en un mismo día. La intención de LOS es relacionar la **calidad del servicio de tráfico** con un **volumen de tráfico** dado. Es

un término que designa un rango de condiciones de operación en un tipo particular de instalación (Mathew & Rao, 2007).

El **HCM** (2010) propone los niveles de servicio como una serie de letras que designan un rango de condiciones operativas en un tipo particular de instalación de tráfico. **HCM** (2010) define seis letras **LOS**, siendo, A, B, C, D, E y F, donde **A** indica la mejor calidad de servicio y **F** indica la peor.

Seguidamente, se exponen imágenes y descripciones de cada uno de los niveles de servicio según Virginia Department of Transportation (2020):

LOS A: Tráfico de flujo libre con usuarios individuales que prácticamente no se ven afectados por la presencia de otros en el flujo de tráfico.



Figura 16: Nivel de Servicio A.

Fuente: Virginia DOT

LOS B: Flujo de tráfico estable con un alto grado de libertad para seleccionar la velocidad y las condiciones de funcionamiento, pero con cierta influencia de otros usuarios.



Figura 17: Nivel de Servicio B.**Fuente: Virginia DOT**

LOS C: Flujo restringido que se mantiene estable, pero con interacciones significativas con otros en el flujo de tráfico. El nivel general de comodidad y conveniencia disminuye notablemente en este nivel.

**Figura 18: Nivel de Servicio C.****Fuente: Virginia DOT**

LOS D: Flujo de alta densidad en el que la velocidad y la libertad de maniobra están severamente restringidas y la comodidad y la conveniencia han disminuido a pesar de que el flujo permanece estable.

**Figura 19: Nivel de Servicio D.****Fuente: Virginia DOT**

LOS E: Flujo inestable en o cerca de los niveles de capacidad con bajos niveles de comodidad y conveniencia.



Figura 20: Nivel de Servicio E.

Fuente: Virginia DOT

LOS F: Flujo de tráfico forzado en el que el volumen de tráfico que se aproxima a un punto excede la capacidad que se puede atender. Se caracteriza por ondas intermitentes, tiempos de viaje deficientes, poca comodidad y conveniencia, y una mayor exposición a accidentes



Figura 21: Nivel de Servicio F.

Fuente: Virginia DOT

Según Mathew & Rao (2007) los conceptos de Nivel de Servicio se basan en las **Medidas de Efectividad** (*Measure of Effectiveness*) (**MoE**) de la instalación vial en cuestión. Típicamente son usados 3 parámetros para definirlos, siendo ellos:

- 1. Velocidad y Tiempo de viaje**
- 2. Densidad**
- 3. Demora.**

Una de las medidas importantes para juzgar de la calidad del servicio es la cantidad de tiempo gastado en el viaje. Por lo tanto, **la velocidad y el tiempo de viaje** se consideran los puntos más efectivos para definir el LOS de una instalación. La **densidad** da la proximidad de otros vehículos en la corriente. Dado que afecta la capacidad de los conductores para maniobrar en el flujo de tráfico, también se usa para describir LOS. La **demora** es un término que describe el tiempo excesivo o inesperado que se gasta en un viaje. Muchas medidas de demora específicas se definen y utilizan como *MOE* en el Highway Capacity Manual (Mathew & Rao, 2007).

Highway Capacity Manual (HCM) usa la velocidad de viaje (operating speed), y el volumen de tráfico con relación a la capacidad (relación v/c) para distinguir entre varios niveles de servicio. El valor de la relación v/c puede variar entre 0 y 1. Según la velocidad de desplazamiento y la relación v/c. (Mathew & Rao, 2007). Según se muestra en la siguiente Figura 17.

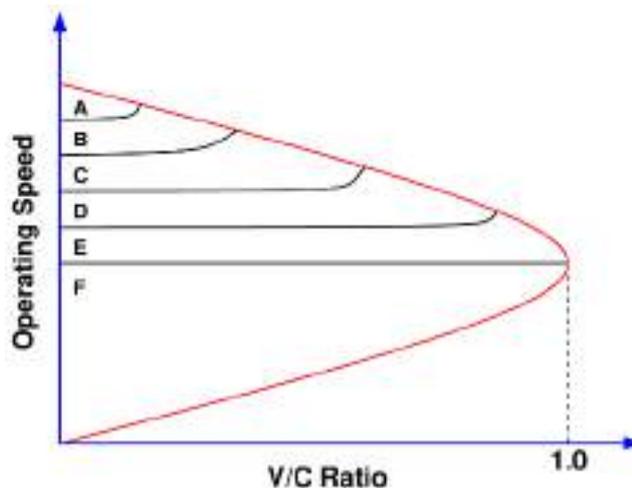


Figura 22: Nivel de servicio de un segmento básico de carretera, expresado en términos de velocidad operativa (*operating speed*) y la relación volumen-capacidad (*V/C Ratio*)

Fuente: Mathew (2019)

La clasificación más importante de las instalaciones de transporte desde la perspectiva de la ingeniería se basa en la continuidad del flujo, es decir, flujo **ininterrumpido** y flujo **interrumpido**.

El flujo ininterrumpido es el flujo de tráfico en el que no hay obstrucciones para el movimiento de vehículos a lo largo de la carretera. Las Vías Expresas son un ejemplo de este tipo de instalación. HCM define los niveles de servicio de tramos de carretera en función de la **densidad**, tal como se describe en la siguiente Tabla 2:

LOS	Densidad (veh/km/carril)	Velocidad de Flujo Libre (km/h)	Volumen/Capacidad (V/C)
A	0 - 7	120	0,35
B	7 - 11	120	0,55
C	11 - 16	114	0,77
D	16 - 22	99	0,92
E	22 - 28	85	1
F	> 28	< 85	> 1

Tabla 2: LOS para un segmento básico de carretera.

Fuente: Adaptado de HCM (2010)

El flujo interrumpido se refiere a la condición en la que el flujo de tráfico en la carretera se obstruye debido a alguna razón. Esto se experimenta en intersecciones semaforizadas e intersecciones no señalizadas o arterias, donde habrá algún tipo de control activo y el vehículo tendrá que detenerse totalmente o, a veces, reducir su velocidad. Así, en intersecciones, la capacidad se define en términos de control de **demora**, es decir, en segundos/vehículo, tal como lo expresa la Tabla 3. En las arterias, es decir caminos de tramos largos con muchas intersecciones en el medio, obviamente habrá interrupción en el flujo de tráfico. Aquí, la capacidad se expresa en términos de velocidad de viaje promedio (km/h).

LOS	Tiempo de Demora en Intersección Semaforizada (segundos/vehículo)	Tiempo de Demora en Intersección No Semaforizada (segundos/vehículo)
A	≤ 10	≤ 10
B	10 - 20	10 - 15
C	20 - 35	15 - 25
D	35 - 55	25 - 35
E	55 - 80	35 - 50
F	> 80	> 50

Tabla 3: LOS de una intersección en base al Tiempo de Atraso.

Fuente: Adaptado de HCM (2010)

Uno de los muchos propósitos de aplicar la estratificación **LOS** es proporcionar a los usuarios no técnicos herramientas rápidas para ayudarlos mejor en la toma de decisiones. Por lo general, se trata de políticos y de la sociedad civil interesados en tomar una decisión (HCM, 2010).

Por consideraciones de costo, impacto ambiental y otras razones, las carreteras y otras instalaciones de tránsito generalmente no están diseñadas para operar en NS A durante las horas pico, sino en NS a continuación, lo que refleja el equilibrio entre el deseo individual de viajes y los deseos y recursos financieros de la sociedad (HCM, 2010).

2.7 SEMAFORIZACIÓN

Con el transcurso del tiempo, se ha descubierto que la instalación de semáforos constituye una solución eficaz para optimizar la funcionalidad y la eficiencia de una intersección vial.

El sistema convencional de control de tráfico semaforizado con *tiempos fijos* es uno de los más populares y viejos sistemas en el mundo. El controlador de este tipo de sistema está programado para cambiar los tiempos de las luces en intervalos fijos y preestablecidos, independientemente de la situación actual del tráfico en la intersección. Aunque este sistema ha sido ampliamente utilizado y es relativamente simple, su eficacia puede verse limitada en situaciones de tráfico intenso o en horarios de tráfico fluctuante. En estos casos, puede resultar beneficioso emplear sistemas más avanzados, como los semáforos con temporizador adaptativo, o semáforos inteligentes, que se ajustan automáticamente en función al flujo de tráfico en tiempo real y pueden mejorar significativamente la eficiencia del tráfico en la intersección (García et al., 2015). Este enfoque dinámico del control de tráfico puede mejorar significativamente la eficiencia del tráfico en la intersección (Moras, 2009).

Varios investigadores, entre ellos Akgüngör, Singh, y Hellinga, han concluido que los retrasos en las intersecciones semaforizadas varían según el volumen de tráfico durante el día. Por lo tanto, se propone como solución la implementación de ciclos de semáforos diferentes a lo largo del día, según la demanda de tráfico en cada momento. Estos ciclos pueden ser programados manualmente, los semáforos de tiempo fijo deberán permitir su ajuste periódico a las variaciones de los volúmenes de tránsito, o pueden ser controlados automáticamente mediante la utilización de semáforos inteligentes. Esto puede mejorar significativamente la eficiencia del tráfico en la intersección y reducir los retrasos en horas pico (Akgüngör, 2007), (Singh, 2009) y (Hellinga, 2008).

De igual manera, según la Secretaría de Movilidad de Medellín y CONTRAN (2014), lo semáforos de tiempos fijos pueden ser más aceptados por los usuarios en comparación a los inteligentes, principalmente en zonas en donde exista tránsito de peatones intenso y constante. En adición, la programación de controladores de tiempos fijos es más simple, el costo de implantación y operación es menor, y su mantenimiento es más sencillo.

A efectos de estandarización de conceptos en la materia, Buckholz (2010) define una **fase o etapa** como el intervalo de tiempo en el que uno o más grupos de movimientos reciben simultáneamente el derecho de paso. De esta manera, una fase se caracteriza por la combinación de movimientos vehiculares que tienen lugar al mismo tiempo, tal como se indica en la Figura 23.

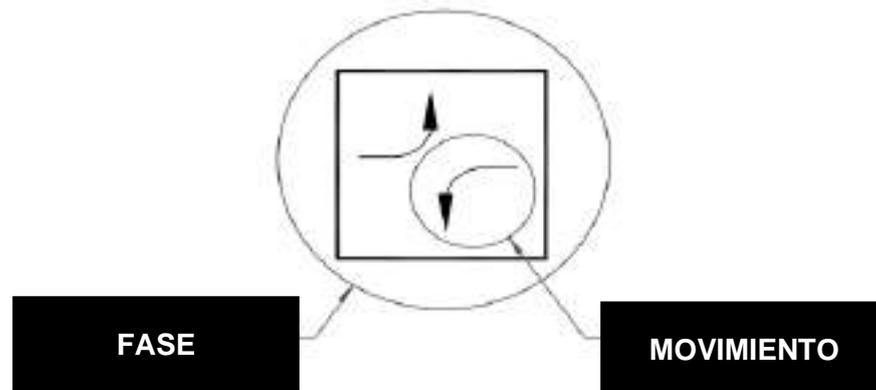


Figura 23: Ilustración de los conceptos de Movimiento y Fase.

Fuente: Adaptado de Buckholz (2010)

Apoyando con definiciones presentadas por CONTRAN (2014), un **Grupo de Movimientos** es el conjunto de movimientos posibles para una vía que se aproxima a la intersección, y que reciben simultáneamente derecho de paso. Consecuencia de esto, es la definición del concepto **Grupo Semafórico**, que representa al conjunto de semáforos con indicaciones luminosas idénticas, que controlan las fases o grupos de movimientos, como muestra la Figura 24.

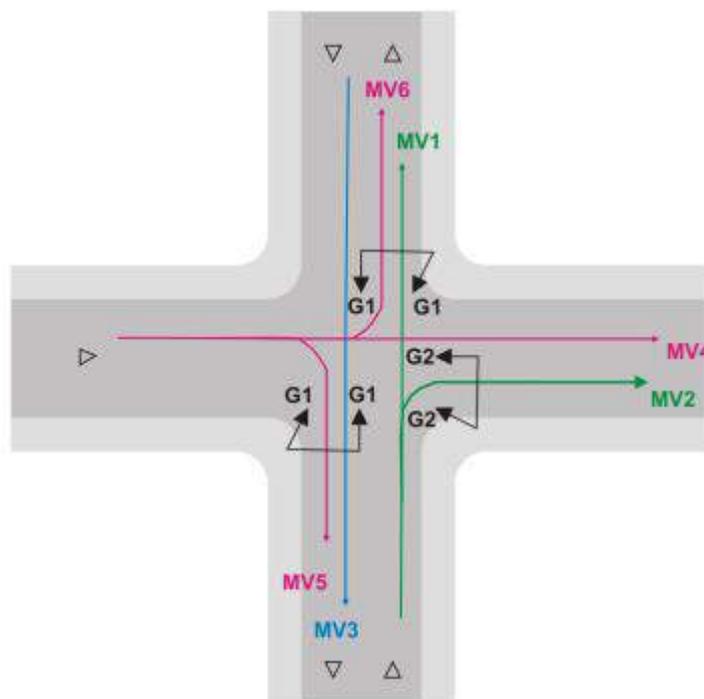


Figura 24: Ilustración de los conceptos de Grupo de Movimientos y Grupo Semafórico.

Fuente: CONTRAN (2014)

Donde:

Grupo de Movimientos 1: conjunto formado por los movimientos MV1 & MV2

Grupo de Movimientos 2: conjunto formado por el movimiento MV3

Grupo de Movimientos 3: conjunto formado por los movimientos MV4, MV5 & MV6

Grupo semafórico 1 (G1): conjunto de semáforos que controla los grupos de movimientos 1 & 2

Grupo semafórico 2 (G2): conjunto de semáforos que controla el grupo de movimientos 3

Cada fase está compuesta por 3 señales luminosas con significados diferentes que informan al conductor sobre su esperado actuar en la vía, según CONTRAN (2014) los mismos son:

- **Rojo (1):** Indica la prohibición del derecho de paso, el conductor obligatoriamente debe detener el vehículo ante la inminencia de esta señal.
- **Verde (2):** Indica el permiso del derecho de paso, el conductor debe iniciar o continuar la marcha pudiendo efectuar movimientos de acuerdo con la indicación luminosa, observando las normas de circulación preestablecidas para la vía.
- **Amarillo (3):** Indica el fin del derecho de paso, por lo tanto el conductor debe detener el vehículo salvo que sea imposible realizar tal acción en condiciones seguras.

En la Figura 25 se observan las etapas de una fase semafórica.

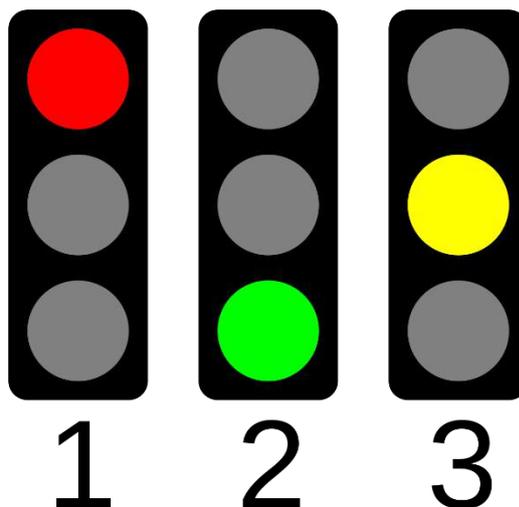


Figura 25: Etapas de una Fase Semafórica

Fuente: [Wikipedia](#)

Así, un diagrama de etapas es la representación gráfica de la asignación de movimientos que se pueden realizar, tanto motorizados como no motorizados, en cada etapa

del ciclo semafórico. La Figura 26 muestra un ejemplo de un diagrama de etapas para controlar los movimientos que se muestran en la Figura 24.

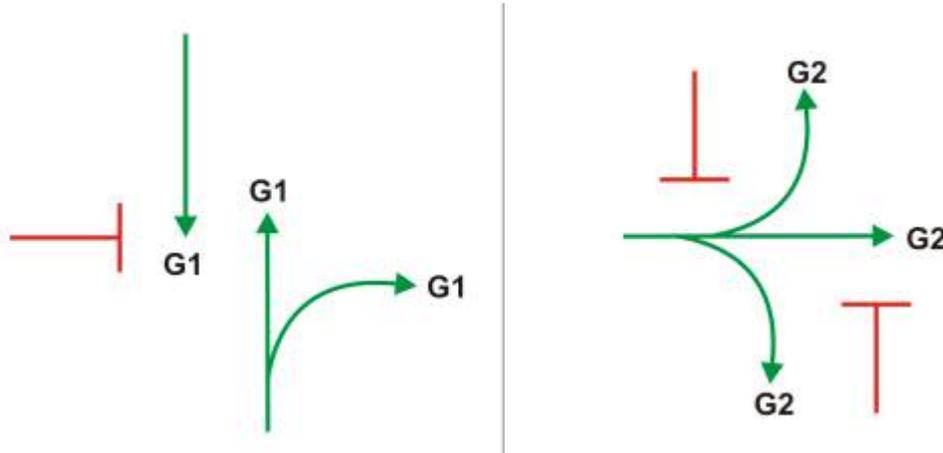


Figura 26: Ejemplo de Diagrama de Etapas.

Fuente: Adaptado de CONTRAN (2014)

Según la COTRAN (2014), un diagrama de fases semafóricas consiste en representar gráficamente la duración y secuencia de intervalos y etapas semafóricas mediante barras horizontales, asociándolas a grupos semafóricos. La Figura 27 presenta un diagrama de fases relacionado al diagrama de etapas que se muestra en la Figura 26.

INSTANTE (s)	0	30	34	36	74	78	80
GRUPO SEM 1	[Barra Verde]		[Barra Amarilla]	[Barra Roja]	[Barra Roja]		
GRUPO SEM 2	[Barra Roja]			[Barra Verde]	[Barra Verde]	[Barra Amarilla]	[Barra Roja]
INTERVALO	1	2	3	4	5	6	
DURACIÓN	30	4	2	38	4	2	
% DEL CICLO	38	5	2	48	5	2	
FASE	1			2			

Figura 27: Ejemplo de Diagrama de Fases.

Fuente: Adaptado de CONTRAN (2014)

De la Figura 27, definimos adicionalmente que un intervalo es el periodo de tiempo en el que se mantiene invariable la configuración lumínica de los semáforos que controlan el tráfico en un lugar determinado. Cabe resaltar que el concepto de **Grupo Semafórico** y **Fases** puede, según autores, variar o utilizarse de manera intercambiable.

Según Mannering y Washburn (2020) el tiempo de ciclo (t_c) es la sumatoria de todas las fases de los semáforos involucrados en una intersección, este suele expresarse en segundos. Así, para una intersección de 4 ramas, donde cada una posee un semáforo, un

ciclo es el tiempo que demora la secuencia de cuatro indicaciones sucesivas de *verde*, *amarillo* y *rojo*, como indicado en la Figura 28.

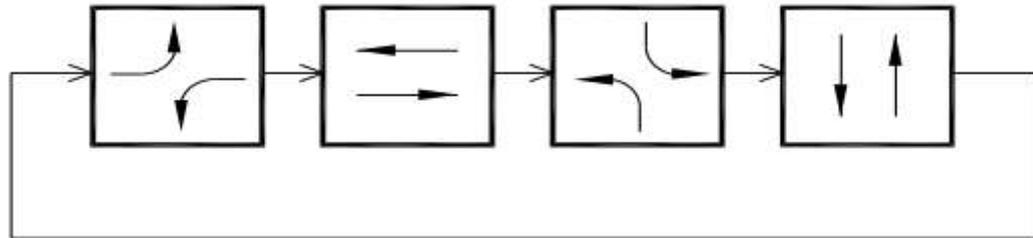


Figura 28: Ilustración de un Ciclo Semafórico, en una intersección de cuatro ramas.

(donde 1 ciclo = una vuelta al circuito presentado)

Fuente: Buckholz (2010)

Como complemento de la Figura 23, en la Figura 28, se evidencia que cada flecha representa un movimiento y cada cuadrado una fase; así, se puede notar que el ciclo ejemplificado está compuesto por 8 movimientos y 4 fases.

Un método de análisis del tiempo óptimo de ciclo semafórico es el propuesto por Webster en 1958, el mismo es universalmente aceptado específicamente por proveer valores de ciclos que resultan en demoras mínimas y por tanto buenos niveles de servicio, siendo el método que adoptan la mayoría de los softwares de diseño (Alba & Hernández, 2013).

El método se basa en observaciones de campo y simulaciones de un rango amplio de condiciones viales. El mismo considera llegadas aleatorias, se sugiere no utilizarlo cuando no se cumple esta condición, ni tampoco en intersecciones con alto grado de saturación (Alba & Hernández, 2013). Webster demuestra que la demora mínima de todos los vehículos en la intersección se puede obtener por medio de la siguiente ecuación (CONTRAN, 2014):

$$t_{co} = \frac{1,5 * (T_p + 5)}{1 - \sum_i^n y_i}$$

Ecuación 10: Tiempo de Ciclo
Semafórico

Donde:

t_{co} = tiempo de ciclo óptimo, en segundos

T_p = tiempo perdido total, en segundos

y_i = tasa de saturación. Máximo valor de la relación entre el flujo actual y el flujo de saturación para el carril crítico de la fase i

n = número de etapas

Según Webster, los tiempos de ciclo en el rango de 0,75 a 1,5 del tiempo de ciclo óptimo producen retrasos promedio por vehículo como máximo un 20% más altos que el valor de retraso obtenido con el tiempo de ciclo óptimo.

En la práctica, los tiempos de ciclo de las intersecciones deberían oscilar entre 60 y 75 segundos, pero variables como el volumen de tráfico, la complejidad de las intersecciones y la cantidad de conflictos pueden alterar esta estimación. Sin embargo, el tiempo de ciclo debe mantenerse, siempre que sea posible, por debajo de los 120 segundos para no generar esperas excesivas (AQUINO, 2017).

2.8 MÉTODOS DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE INTERSECCIONES

Para mejorar el nivel de servicio en una intersección, es fundamental realizar el análisis y evaluación de esta, para lo cual es necesario recopilar información relevante. En el análisis de intersecciones, la información recopilada se centra en la geometría de la intersección y los conflictos que se presentan en ella. Los puntos de conflicto en una intersección se han determinado tradicionalmente mediante la inspección visual, utilizando fotografías o diagramas que muestran la configuración de la intersección y las relaciones espaciales entre los vehículos y los peatones que interactúan en ella (Muppa et al., 2018).

Una vez recolectada la información necesaria, se procede a realizar el análisis correspondiente. El método tradicional utilizado para evaluar intersecciones, sean semaforizadas o no, es a través de manuales estandarizados. El **Highway Capacity Manual (HCM)**, como visto en la sección [2.6](#), uno de los más renombrados a nivel mundial, proporciona parámetros generales para la evaluación de intersecciones, y los capítulos específicos de intersecciones semaforizadas y no semaforizadas en el HCM contienen la información necesaria para la comprensión y recopilación de los datos requeridos para el análisis del nivel de servicio (García et al., 2015)

La metodología presentada en el manual HCM es un método viable y seguro para la evaluación de capacidad, saturación y del nivel de servicio de una intersección, ya que se toman en cuenta factores como la saturación de flujo vial, presencia de camiones de carga pesada, estacionamientos en la calzada, los movimientos peatonales, ciclistas, los ciclos de los semáforos y diversos factores que puedan afectar la funcionalidad de una intersección. Estos factores y parámetros son utilizados alrededor del mundo para el análisis y evaluación de intersecciones, lo que hace que la metodología del manual HCM sea ampliamente reconocida y utilizada (García et al., 2015).

La simulación es otra opción para analizar intersecciones urbanas que utiliza métodos computarizados. En este método, se utiliza un software para modelar las condiciones actuales de un cruce, experimentar con los datos existentes y proponer soluciones necesarias. Archer y Young evaluaron una intersección utilizando el software VISSIM, que utiliza los modelos

psycho-physical car-following de Wiedemann para determinar la reacción del conductor y el modelo *rule-based* de Sparmann para los cambios de carril (García et al., 2015).

Archer y Young recolectaron información de la intersección, como los tiempos de los semáforos, el flujo vehicular, el tipo de vehículos, los movimientos de los vehículos, la velocidad promedio y el número de infractores que pasan el semáforo en rojo, directamente del lugar. Con esta información, simularon la intersección en su estado actual y evaluaron su comportamiento. Luego de esto, propusieron diferentes medidas para mejorar la intersección, las cuales fueron simuladas para observar cómo afectaban al comportamiento de la intersección.

Según los resultados obtenidos por Archer y Young, se encontró que la extensión del tiempo de la luz ámbar fue la medida más efectiva para reducir las infracciones de luz roja en la intersección evaluada. Sin embargo, desde una perspectiva de desempeño de tráfico, extender el tiempo de ámbar resultó ineficiente (Archer, 2010). Por lo tanto, se evidenció que la simulación computacional se constituye como herramienta útil para obtener mejoras sostenibles en la operación de una intersección, basadas en los resultados del análisis realizado.

Vale resaltar que la mayoría de los accidentes de tránsito ocurren debido a una secuencia de eventos muy específica que, en condiciones normales, no se puede identificar claramente. Según Hauer (2002), es difícil, por razones éticas y operativas, diseñar experimentos viales para evaluar el impacto de diferentes estrategias de ingeniería en la seguridad vial.

Es en este contexto que el uso de técnicas de simulación ha permitido el desarrollo de nuevas tecnologías destinadas a optimizar el rendimiento operativo de los sistemas de transporte. Más recientemente, se ha investigado con mayor interés el potencial del uso de la microsimulación del tráfico en los estudios del rendimiento de la seguridad vial. Uno de los mayores atractivos de este tipo de enfoque es el hecho de que es posible planificar experimentos en un entorno virtual, evitando la exposición de los usuarios reales a situaciones de riesgo (Cunto & Loureiro, 2011).

En adición a lo anterior, una de las diferencias principales entre los análisis estandarizados y las simulaciones radica en que los procedimientos deterministas del HCM otorgan un valor único para todas las medidas de rendimiento en función de las especificaciones de los datos de entrada mientras que las herramientas de análisis estocástico aplican un proceso de aleatorización que puede dar diferentes valores para las medidas de rendimiento cada vez que se repite el proceso.

En otras palabras, las herramientas de simulación producen una distribución de valores para cada medida de rendimiento, como se esperaría de una serie de estudios de



campo repetidos. Es esencial para apoyar la toma de decisiones representar la distribución de valores en términos de un único valor representativo.

3 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE TRÁFICO

*“Una simulación de tráfico es una réplica virtual de escenarios de tráfico reales. En este entorno digital, los planificadores pueden modelar cruces y corredores y, básicamente, cualquier infraestructura, desde carreteras hasta intercambios y centros de transporte. Una simulación de transporte, basada, por ejemplo, en el software **PTV Vissim**, ofrece una visión realista y detallada de los flujos de tráfico multimodal y la interacción de diferentes vehículos y usuarios de la carretera. Se pueden definir múltiples escenarios hipotéticos para probar y analizar las medidas de tráfico y sus efectos, antes de implementarlas en el mundo real.”* (PTV Group, 2023).

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los simuladores computacionales de tráfico son herramientas indispensables para estudiar los efectos de un proyecto vial previo a su implementación. Los microsimuladores de tráfico, como también son llamados, tienen la ventaja de permitir experimentaciones en un entorno virtual, evitando exponer a los usuarios a situaciones de riesgo (Ribeiro et al, 2017).

Los programas de simulación actuales utilizan teorías propuestas por expertos en la materia, lo que les permite ser muy precisos al representar la realidad y cualquier tipo de flujo de tráfico con diferentes modos de transporte (García et al. 2015). Según Vidal Roca (2010), el uso de la simulación no es tan sólo una alternativa, sino que es la más adecuada para el estudio pragmático de proyectos de ingeniería de tránsito y supone una herramienta sin precedentes, debido a la modelización flexible que ofrece, tanto en cuestiones de adaptación al entorno como de cuidado del detalle.

El modelado del transporte sucede varios niveles de detalle y escala, desde regiones enteras, hasta cruces individuales. La Figura 29 muestra que el intercambio de datos debe operar entre los diferentes niveles de modelado para promover la coherencia analítica.

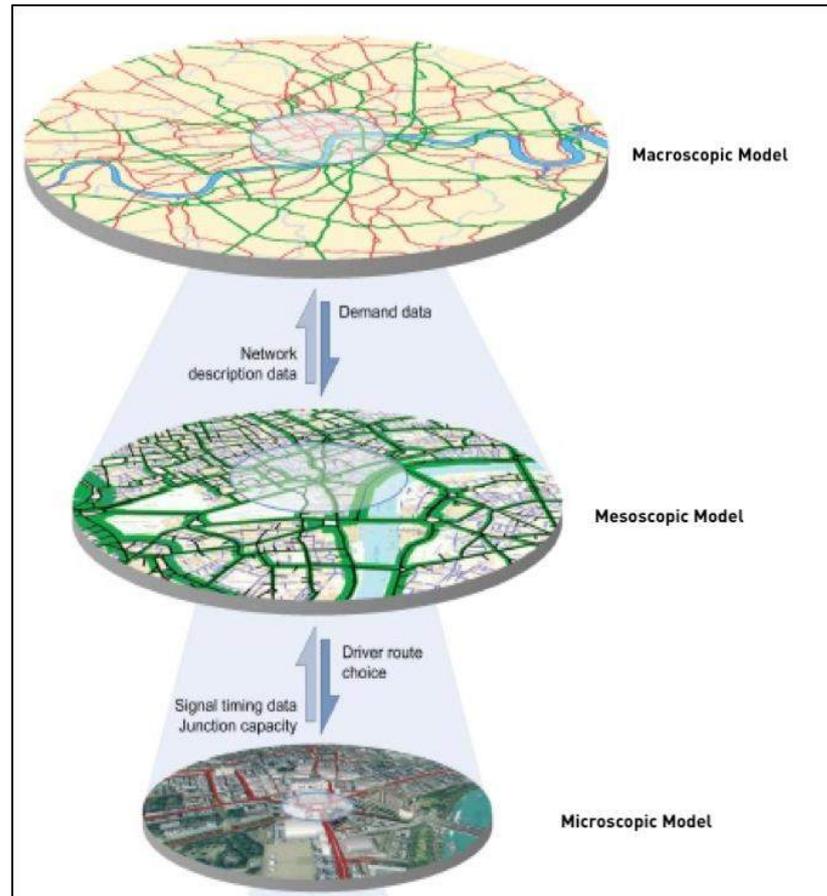


Figura 29: Niveles de Modelado Computacional según escala.

Fuente: Transport for London (2021).

Según Transport for London (2021), los principales niveles de simulación son definidos de la siguiente manera:

Los **modelos macroscópicos**, también conocidos como modelos estratégicos, tienen como objetivo modelar el equilibrio de los viajes entre los diferentes modos disponibles en zonas geográficas extensas. Para agilizar el proceso de simulación, la red de carreteras se modela a nivel agregado. La demanda de los viajeros se define típicamente en términos de viajes personales y se deriva de datos demográficos del censo y comportamientos de viaje observados en encuestas o trabajos de campo específicos.

Los **modelos mesoscópicos** son típicamente utilizados para respaldar planes de desarrollo urbano importantes. Estos modelos están diseñados para predecir cómo la desviación del tráfico en carretera afectará a toda la zona y cómo se elegirán las rutas alternativas.

Los **modelos microscópicos**, también conocidos como microsimulaciones, tienen como objetivo reproducir el entorno de simulación con un alto nivel de detalle. Este tipo de modelo es capaz de simular el movimiento de diversos modos de transporte que se desplazan dentro de una red de carreteras, imitando el comportamiento exacto de los mismos. El modelo

microscópico evalúa el tráfico vehículo por vehículo, midiéndolos como partículas sin masa y considerando sus interacciones.

Los modelos macroscópicos, en general, son deterministas, es decir, funcionan con valores medios de entrada y generan como salida un conjunto único de resultados. Sin embargo, los modelos mesoscópicos y microscópicos son estocásticos, es decir, tienen como entrada una o más variables aleatorias, que conducen a salidas aleatorias donde al menos una de las características operativas viene dada por una función de probabilidad (RIBEIRO et al, 2017).

3.2 MICROSIMULACIÓN

Los algoritmos de micromodelado son los responsables por la representación dinámica de los vehículos en la red, teniendo así un papel fundamental en el proceso de simulación de las interacciones vehiculares y, en consecuencia, de los conflictos de tránsito. Tradicionalmente, tres algoritmos forman el núcleo de los sistemas de microsimulación, estos son: algoritmos de seguimiento de automóviles (*car-following*), aceptación de brechas y cambio de carril (Cunto & Loreiro, 2011).

Los modelos de *car-following* (CFM) buscan representar el proceso mediante el cual los conductores determinan su velocidad y la separación con relación a los vehículos que tienen delante. Los modelos de *aceptación de brechas* se utilizan para representar el proceso de toma de decisiones de los conductores en carreteras secundarias con el deseo de cruzar o insertarse en la corriente de tráfico principal. Los *cambios de carriles* de circulación en la microsimulación se representan a través de un proceso de decisión jerárquico que considera que el deseo de cambiar de carril puede ocurrir por obstrucciones o lentitud de los vehículos en el carril actual o por la necesidad de ajustes en su ruta (Cunto & Loreiro, 2011).

Según PTV (2023a), los datos de entrada para un modelo de simulación constan de tres partes principales:

- **Red de tráfico:** carreteras, intersecciones, vías férreas, terreno transitable en general, y sus respectivas geometrías.
- **Demanda de tráfico:** cantidad y composición de medios de transporte que se trasladan de un origen específico a un destino específico.
- **Control de intersecciones:** señales de prioridad de paso, de detención completa y semaforización.

La calidad de los datos es crítica, puesto que un modelo virtual solo puede ser tan bueno como los datos de entrada y la respectiva calibración del modelo.

Según PTV (2023a), los parámetros de comportamiento y el momento de entrada en la red de los vehículos son obtenidos aleatoriamente de una serie de posibles distribuciones

estadísticas. El resultado de una única ejecución de simulación debe entenderse como un único flujo de tráfico real posible en un único día aleatorio. Por lo tanto, esto podría ser un caso atípico extremo. Para obtener una impresión significativa de la posible distribución de los resultados, es necesario ejecutar múltiples ejecuciones de simulación, con diferentes semillas aleatorias (*random seeds*).

Suponiendo un modelado correcto de la red y una calibración adecuada, la distribución de los resultados de la simulación debería ser similar a la distribución de los estados de tráfico reales en diferentes días. Los valores promedio de todas las simulaciones no suelen ser los indicadores más interesantes, sino la frecuencia relativa de las ocurrencias, por ejemplo, tras simulaciones, se podría decir que se espera un gran atasco de tráfico el 70% de los días.

En comparación con el método HCM, la microsimulación tiene un alto índice de confianza y describe mejor el escenario fáctico de las carreteras brasileñas (MARTÍN et al., 2019).

3.3 PTV VISSIM

PTV Vissim es un software de simulación de flujo de tráfico multimodal a escala meso-microscópica desarrollado por *PTV Planung Transport Verkehr AG*, un grupo empresarial de Alemania. El nombre se deriva de "**V**erkehr **I**n **S**tädten - **S**IMulationsmodell", expresión que en alemán significa, "Tráfico en las Ciudades - Modelo de Simulación". PTV Vissim se desarrolló por primera vez en 1992 y hoy es el software líder del mercado a mundial por sus sobresalientes prestaciones y confiabilidad. (Noronha, 2016).

VISSIM es uno de los softwares más utilizados para simular, evaluar y validar nuevas políticas de transporte y sistemas de control; es un simulador multimodal que permite al usuario definir una gama completa de tipos de vehículos, incluyendo automóviles, autobuses, camiones ligeros y pesados, trenes y motocicletas, así como peatones y ciclistas (Noronha, 2016).

De manera general, según PTV (2023a), algunas de las funciones específicas del software PTV VISSIM son

- **Modelado de Emisiones de Tráfico:** PTV Vissim permite comprender cómo propuestas de solución al congestionamiento de tráfico impactan en las emisiones de carbono de los vehículos. Esto es posible mediante una alianza entre PTV Group y la empresa Bosch, que integra datos y cálculos de emisiones en el software, y se logra procesando datos integrales del comportamiento de tráfico y los tipos de vehículos específicos del país.
- **Modelado de Flujo Peatonal:** Mediante el módulo embutido PTV Viswalk, un software de simulación de flujo peatonal microscópico, es posible realizar una simulación microscópica de peatones, donde no solo se representa gráficamente

peatones, sino también la interacción individual entre ellos y los objetos a su alrededor.

- **Modelado de Control de Tráfico Inteligente:** PTV Vissim permite mapear una variedad de sistemas inteligentes de gestión de tráfico (o Sistemas Avanzados de Gestión de Tráfico - ATMS) para estabilizar el flujo de tráfico y aumentar la seguridad del tráfico multimodal.
- **Modelado con Vehículos Autónomos:** PTV Vissim es capaz de estudiar el comportamiento de conducción de vehículos autónomos e interconectados y sus efectos en el flujo de tráfico. El software muestra secuencias de movimiento específicas, así como interacciones con otros vehículos no conectados.
- **Modelado de Redes de Transporte Público:** PTV Vissim no solo simula el transporte privado, sino también las líneas de transporte público, según sus horarios, paradas, tipos de paradas y tiempos de permanencia. La coordinación de modelos con controles de temporización de señales le permite simular diferentes variantes de priorización de transporte público y analizar los efectos en la red del transporte público y privado en simultáneo.

3.3.1 Algoritmos de Modelaje

VISSIM tiene como componente fundamental el modelo de seguimiento de automóviles o *car-following model* (CFM) propuesto por **Wiedemann** (1974) utilizando estudios en el área de la psicología aplicados a la conducción. La suposición principal en el CFM de **Wiedemann** es que el conductor es capaz de percibir la aproximación del vehículo frente a él a través de la tasa de cambio del tamaño aparente de este vehículo. Además, el conductor estima la velocidad relativa entre los dos debido al cambio en el ángulo de visión del vehículo líder. Este tipo de CFM también se conoce como *modelo psicofísico* o de *puntos de acción* (Cunto & Loreiro, 2011).

El modelo de Wiedemann considera cuatro etapas de conducción percibidas por los conductores:

1. **conducción libre**, donde el vehículo no está influenciado por ningún vehículo frente a él.
2. **aproximación**, donde el vehículo está conscientemente influenciado por el vehículo en frente, dado que el conductor percibe un vehículo más lento.
3. **persecución**, donde el vehículo está un proceso de seguimiento, siendo influenciado por el vehículo de adelante en forma no consciente que transita a mayor velocidad.

4. frenado de emergencia, donde el vehículo queda a una distancia de separación menor a la deseada y debe frenar para evitar la colisión.

Las etapas se diferencian por seis curvas límite de la percepción humana, obtenidas a través de expresiones matemáticas que consideran explícitamente los errores en el juicio del espacio, la velocidad y las tasas de aceleración/desaceleración para el mismo conductor a lo largo del tiempo, así como entre diferentes conductores (Wiedemann y Reiter, 1992).

Investigaciones sugieren que la estructura básica de este modelo es capaz de representar de manera coherente el comportamiento natural de los conductores (Cunto & Loreiro, 2011).

El proceso de aceptación de brechas en VISSIM se puede modelar mediante el establecimiento de reglas de prioridad de paso o utilizando el concepto de áreas de conflicto. Utilizando las reglas de prioridad, el usuario define los movimientos con preferencia de paso y adelantamiento, y definiendo un espacio mínimo para permitir la entrada a la corriente principal de tráfico. En la opción de modelado utilizando el concepto de áreas de conflicto, la propia aplicación detecta estas áreas en base a los atributos geométricos de la vía, así, en la simulación, el conductor en la carretera secundaria evalúa el espacio libre disponible y la situación más allá del área de conflicto para luego decidir si acepta o no el espacio libre y avanzar con el movimiento (Cunto & Loreiro, 2011).

Según Cunto y Loreiro (2011), en cuanto a los algoritmos de cambio de carril, VISSIM representa este proceso de forma jerárquica a partir de las siguientes preguntas básicas iterativas:

1. *¿Existe el deseo de cambiar de carril?*
2. *¿Las condiciones del tráfico en el posible carril de destino son más favorables que en el carril actual?*
3. *¿Es posible cambiar de carril?*

La Figura 30 presenta los parámetros considerados por la aplicación VISSIM en su algoritmo de cambio de carril.

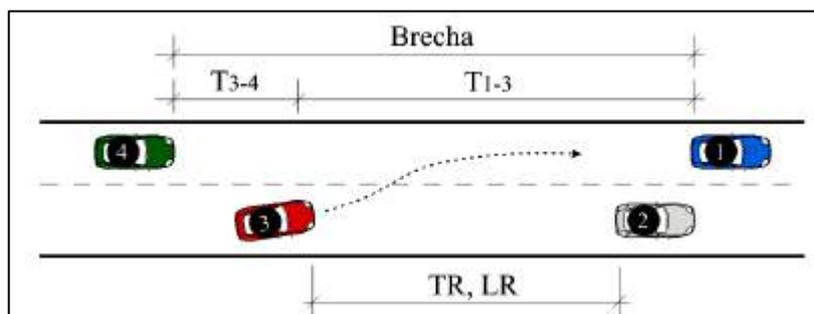


Figura 30. Parámetros para Cambio de Carril.

Fuente: Adaptado de Wiedemman & Reiter, (1992).

En la figura anterior se observa que el vehículo 1 es el líder del carril deseado, el vehículo 2 es el líder del carril actual, el vehículo 3 es el vehículo cambiando de carril, y el 4 es el vehículo seguidor en el carril deseado.

Se observa también que T1-3 y T3-4 son brechas, que TR representa al intervalo de tiempo y LR es la distancia de reacción.

3.3.2 Calibración y Validación de la Simulación

Las herramientas comerciales de simulación microscópica, durante las últimas décadas, han ido mejorando sustancialmente, permitiendo representar situaciones de operación del tráfico en vías urbanas y carreteras con un nivel de complejidad creciente, generando así una variedad de resultados que posibilitan diversos tipos de estudios de tráfico (Ayala & Jacques, 2013).

La fiabilidad del simulador de tráfico está intrínsecamente relacionada con su capacidad para reproducir, dentro de un margen de error aceptable, indicadores operativos que representan condiciones reales. En general, el grado de confiabilidad de un modelo se verifica en dos etapas diferentes, llamadas calibración y validación. En la calibración, los parámetros del modelo se cambian sistemáticamente para minimizar la diferencia entre una medida de desempeño obtenida en campo y su valor ficticio. En la validación, a su vez, se debe verificar la discrepancia entre las medidas de desempeño estimadas por el software usando los parámetros calibrados y las obtenidas de datos observados en campo (Cunto & Loreiro, 2011).

Todos los modelos computacionales ofrecen parámetros con valores por defecto (*default*), y corresponde a los técnicos identificar y calibrar los parámetros de tal forma que las simulaciones reproduzcan valores acordes con la realidad.

Esta calibración implica un cierto ajuste de los valores de los diferentes parámetros que influyen en los resultados de la simulación. Sin embargo, dado el gran número de parámetros presentes en la mayoría de los microsimuladores de tránsito y el esfuerzo que requiere el proceso de recolección de datos para permitir su calibración, es sumamente difícil realizar un trabajo que contemple todos los aspectos (Ayala & Jacques, 2013).

Por lo general, los esfuerzos para calibrar y validar los modelos de microsimulación que se encuentran en la literatura utilizan medidas agregadas de rendimiento operativo, como el tiempo de viaje promedio, la velocidad promedio, la demora promedio, el volumen promedio, etc. (Archer, 2005; Cunha y Setti, 2006; Maia y Loureiro, 2008).

Ayala & Jacques (2013) afirman que un **proceso de calibración y validación** generalmente se realiza en tres etapas, como se muestra en la siguiente figura.

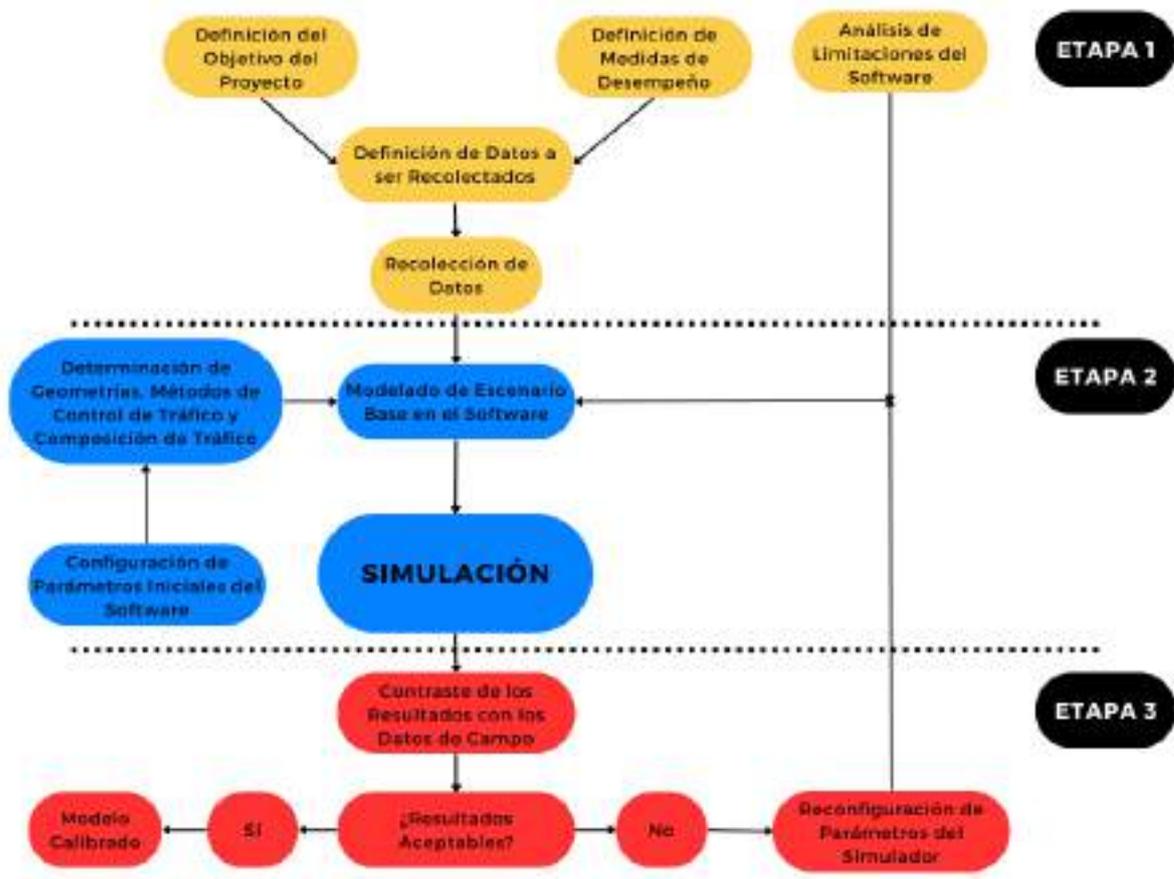


Figura 31: Flujograma del proceso de Modelaje y Calibración.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Ayala y Jacques (2013).

En el tercer paso, llamado de validación, se comparan los resultados producidos por el simulador con los datos disponibles de campo, y si la comparación no es satisfactoria, según criterios previamente establecidos, se deben modificar los valores asignados a los parámetros del simulador hasta que las diferencias de desempeño entre el escenario real y el simulado sea aceptable.

Ayala & Jacques (2013) definen los siguientes parámetros de calibración como los de mayor impacto en los resultados de una simulación, independientemente de las condiciones de geometría, tipo de control y volumen de tráfico:

- Variación de tiempo reacción del conductor
- Aceleración máxima
- Factor de sensibilidad
- Distancia máxima entre vehículos
- Tiempo de reacción
- Desaceleración máxima

Mayores detalles de calibración del proyecto son presentados en el [Capítulo 5](#), donde se exponen, justifican y definen los parámetros de calibración para el software PTV Vissim.

Una vez que se han ingresado todos los parámetros, es necesario ejecutar un conjunto de simulaciones con al menos 5 semillas aleatorias diferentes (The Columbia River Crossing, 2006).

Diferentes valores de *Random Seed* hacen que los flujos de tráfico cambien durante la simulación. Esto permite comparar los resultados obtenidos y evaluar los efectos de las variaciones estocásticas en **Vissim**, pudiendo incluso atribuir un valor mínimo, medio y máximo para cada una (PTV GROUP, 2023).

Según PTV (2023b), una de las formas de validar el estudio es a través de **GEH Statistic (GEH)**, este método es llamado así por su creador, Geoffrey E. Havers. Este es un enfoque estandarizado para comparar dos conjuntos de volúmenes de tráfico, el modelado y el relevado en campo. Este indica qué tan buena es la simulación contra los datos de campo. típicamente un valor de *GEH* por debajo de 5 indica valores apropiados, entre 5 y 10 indica un llamado de atención, ya que puede haber necesidad de más investigaciones, dependiendo del contexto, y un valor por encima de 10 indica un problema en la validación, ya que no cumplió con los requisitos deseables de *GEH* (PTV Group, 2018), el cual es definido como sigue:

$$GEH = \sqrt{\frac{2 * (M - C)^2}{M + C}}$$

Ecuación 11: Validación GEH

Donde:

M = Volumen de Tráfico Modelado

C = Volumen de Tráfico Contado en Campo

4 METODOLOGÍA DE PROYECTO

El presente proyecto es clasificado en cuanto al tipo de investigación como **descriptivo**, pues realiza un análisis de la realidad por medio de una serie de parámetros, y **experimental**, al reproducir de manera controlada fenómenos que provocan un efecto determinado en los resultados. El proyecto se apoya en el **método de estudio de caso** por medio de simulación computacional.

Para cumplir con el objetivo propuesto es necesario analizar la intersección a través del software **PTV Vissim** de micro- y meso-simulación computacional de tráfico multimodal.

Con información obtenida de relevamientos y observaciones de campo, se modela, calibra y analiza una intersección conflictiva, se predice una tasa de crecimiento y volumen vehicular para escenarios futuros, y se elabora una propuesta de intervención que mejore el nivel de servicio y la seguridad de la misma.

Se expone seguidamente el flujograma de pasos para la realización de este proyecto:



Figura 32: Flujograma de la metodología del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

5 ESTUDIO DE CASO

5.1 PRESENTACIÓN DE LA INTERSECCIÓN

La intersección estudiada en este proyecto se encuentra localizada en la periferia de la ciudad de Asunción, capital del Paraguay, específicamente sobre la Av. Madame Lynch. La misma es doble sentido en toda su extensión, está asfaltada en su totalidad, atraviesa nueve barrios, y a pesar de que la misma está compuesta por cuatro carriles, dos por sentido, su ancho es variable.



Figura 33: Avenida Madame Lynch casi Av. Aviadores del Chaco.

Fuente: [Twitter](#).

La importancia de la avenida radica en el hecho de que ella constituye un anillo periférico, o de circunvalación, en la capital, como expuesto en la Figura 34; tal como lo es, por ejemplo, la Avda. General Paz de Buenos Aires. También se destaca que, prácticamente en toda su extensión, la Av. Madame Lynch comparte espacio público con el arroyo Itay, un canal a cielo abierto de desagüe pluvial y cloacal, como se observa en la Figura 33.



Figura 34: Av. Madame Lynch, representada por una línea roja, en el Mapa de Asunción, con su respectiva distribución barrial.

El punto amarillo representa la localización exacta de la intersección en estudio.

Fuente: Adaptado de <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=118543443>

Según KOICA (2023), la Av. Madame Lynch es una de las avenidas asuncenas que registra congestión vehicular constante, además de una operación ineficiente, por ser considerada una vía arterial. Dada tal clasificación, se espera una velocidad alta de alrededor de 60 km/h y un flujo medianamente ininterrumpido, ya que existen cuatro viaductos en todo el recorrido de esta, uno sobre la Av. Eusebio Ayala, el segundo sobre la Av. Santa Teresa, el tercero sobre la Av. Mariscal López y el último en forma de túnel pasando debajo de la Av. Aviadores del Chaco.

El objeto de análisis principal es el cruce **no semaforizado** entre la *Avenida Madame Lynch* y la *Calle Alejo Silva*, de doble sentido (25.283986 S, 57.547486 W). Sin embargo, debido a presencia de otra importante intersección **semaforizada** a una distancia de 170m,

identificada como el cruce entre la *Avenida Madame Lynch* y la *Calle Sinforiano Buzó*, también de doble sentido, se decide definir el área de estudio de manera a incluir ambas, como lo ilustra la Figura 35:



Figura 35: Avenida Madame Lynch intersectándose con las Calles Alejo Silva y Sinforiano Buzó.

Fuente: Adaptado de Google Earth.

Analizando en profundidad la zona en cuestión, cabe destacar que, de manera general, en toda la extensión de la Av. Madame Lynch, no se permiten giros a la izquierda. Sin embargo, esta regla tiene una excepción precisamente en la intersección escogida como caso de estudio en este proyecto.

Por medio de la Figura 36, se visualiza que el par de intersecciones en estudio se encuentran en un punto peculiar de la Av. Madame Lynch, puesto que, se encuentra aproximadamente a la mitad del trecho que la conecta al norte con el viaducto de la Av. Aviadores del Chaco y al sur con el viaducto de la Av. Santa Teresa. Ambas avenidas son consideradas vías arteriales radiales de tránsito rápido, y coincidentemente convergen en la Zona Comercial y Corporativa de la ciudad de Asunción, por lo cual se presentan volúmenes

de tráfico elevados en las mismas. Debido a esto, conductores utilizan la Calle Alejo Silva como vía alternativa para entrada y salida de Asunción.



Figura 36: Vista expandida del área de estudio.

Fuente: Adaptado de Google Earth.

Resalta, adicionalmente, el hecho de que la calle Alejo Silva oficia de desembocadura a la Av. Madame Lynch para la Avenida Laguna Grande, inaugurada en 2018. Esta última canaliza un elevado flujo vehicular de ingreso alternativo a Asunción principalmente desde la ciudad de San Lorenzo del área metropolitana, en substitución a la ya saturada vía arterial radial, Av. Mariscal López.

La problemática del par de intersecciones escogidas tiene su origen, en esencia, principalmente en la posibilidad de realizar giros a la izquierda en ambas direcciones de viaje, en la ausencia de sistemas de control de tráfico, y en los altos volúmenes de tráfico presentes en las vías involucradas. Esto supone el drástico aumento de los puntos de conflicto local y el consecuente aumento en la probabilidad de accidentes de tránsito; el aumento en las colas vehiculares y tiempos de viaje; y la disminución en general del nivel de servicio de las vías.

5.2 RELEVAMIENTO DE DATOS DE LA INTERSECCIÓN

Para evaluar de manera inicial la intersección escogida, se hicieron varias visitas de campo, en varias fechas, así como la conducción vehicular por todas las vías involucradas. De manera específica, las visitas más significativas para la recolección de datos fueron realizadas en los días 5 y 17 de mayo del 2023.

5.2.1 Observaciones Iniciales

Al visitar el área de estudio, compuesta por ambas intersecciones, se observa que el estado de conservación de la infraestructura vial es relativamente malo. Como muestran las Figuras 37 y 38, señalizaciones horizontales y verticales están prácticamente ausentes en todas las calles involucradas en el estudio, los semáforos lucen antiguos, y tanto los paseos centrales como las veredas adyacentes se encuentran sucios y deteriorados. También el pavimento asfáltico muestra señales de desgaste superficial por abrasión y parches de bacheo.



Figura 37: Estado de Conservación de Infraestructura Vial (1).

Fuente: Autor.



Figura 38: Estado de Conservación de Infraestructura Vial (2).

Fuente: Autor.

Debido a la elevada cola vehicular y demora causada por el semáforo de la intersección de *Av. Madame Lynch* y *Sinforiano Buzó*, se destaca también la presencia de un importante número de vendedores ambulantes (>10).

Se observa la existencia de 2 paradas de ómnibus en deplorable estado de conservación dentro del área de estudio, siendo la más importante la que se encuentra sobre *Av. Madame Lynch*, en la intersección con *Alejo Silva*, en la dirección Norte-Sur como se observa en la Figura 39; y otra sobre *Av. Madame Lynch* en dirección Sur-Norte, entre *Sinforiano Buzó*, y *Alejo Silva*; estos son puntos importantes de origen y destino de viajes peatonales en la zona.



Figura 39: Estado de Conservación de Parada de Ómnibus.

Fuente: Autor.

Se observa, sobre la Av. Madame Lynch, en dirección Norte-Sur, una placa de tránsito que indica la prohibición existente para los giros a la izquierda a la Calle Alejo Silva, como lo muestra la Figura 40. A pesar de esto, los conductores realizan este giro sin escrúpulos.



Figura 40: Vehículos realizando giros prohibidos a la izquierda.

Fuente: Autor.

Durante horarios de pico, tanto mañana como tarde, en la intersección de Av. Madame Lynch y Alejo Silva ocasionalmente se observa la presencia de agentes de la Policía Municipal de Tránsito, quienes dirigen el tráfico de manera a evitar accidentes y demoras aún mayores. En la misma se visualiza el riesgo constante de accidentes, puesto que, al ser una intersección no semaforizada de cuatro vías, donde todos los movimientos posibles son permitidos, los puntos de conflicto son numerosos. La Figura 41 muestra una fotografía de la intersección donde se evidencia la falta de orden en la intersección entre Av. Madame Lynch y Alejo Silva, donde inclusive las reglas de prioridad de paso entre avenidas y colectoras son ignoradas debido al nivel de saturación vial.



Figura 41: Situación del cruce entre Av. Madame Lynch y Alejo Silva.

Fuente: Autor.

Complementando a observaciones de campo, con datos de **Google Maps**, se define la hora pico de la mañana como siendo a las 07:30, según la Figura 42, donde se evidencia que la mayor congestión vehicular tiene lugar sobre la Av. Madame Lynch, principalmente en sentido Sur-Norte, y en la Calle Alejo Silva, en sentido Oeste-Este.

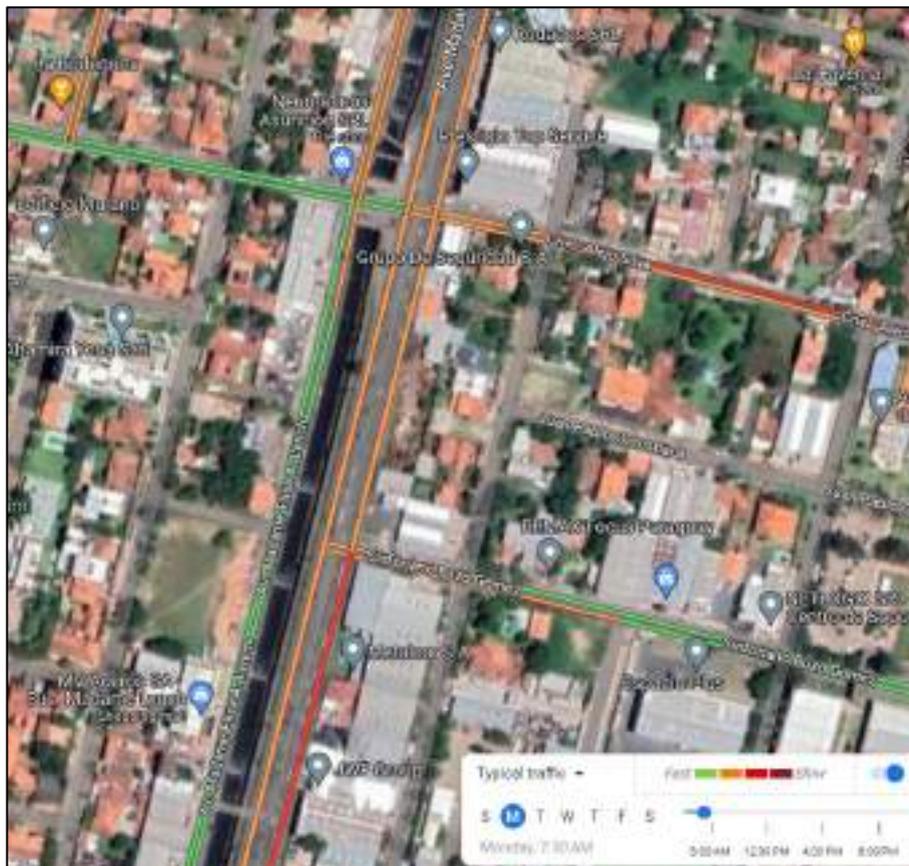


Figura 42: Grado de Congestionamiento en horario pico de mañana.

Fuente: Google Maps.

La hora pico de la tarde es definida para las 18:00, como lo muestra la Figura 43. A diferencia del horario pico de la mañana, para la tarde se evidencia una saturación generalizada de las vías involucradas, en todas las direcciones y todos los sentidos, pero mostrándose un mayor congestionamiento sobre la Av. Madame Lynch en sentido Norte-Sur y Sur-Norte.



Figura 43: Grado de Congestionamiento en horario pico de tarde.

Fuente: Google Maps.

A efectos de optimización de recursos, en este trabajo se decide estudiar la intersección bajo la influencia del tráfico en el **horario pico de la tarde**, puesto que se evidencia que éste presenta un tránsito más caótico, consecuentemente una situación más crítica que merece ser abordada en profundidad.

Adicionalmente, en la visita de campo se realizaron vuelos con dron sobre el área de estudio para captar imágenes y videos que permitan analizar el comportamiento de la intersección. Esto facilita la visualización, de manera clara, por ejemplo, de las distancias de cola vehicular, la interacción entre los modos de transporte, y los movimientos o rutas vehiculares que generan mayores riesgos de accidentes de tránsito. Seguidamente se

presentan imágenes que buscan contextualizar al lector con las problemáticas presentadas en el área de estudio.



Figura 44: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (1)

Fuente: Autor.



Figura 45: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (2)

Fuente: Autor.



Figura 46: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (3)

Fuente: Autor.



Figura 47: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección S-N (4)

Fuente: Autor.



Figura 48: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección E-O.

Fuente: Autor.



Figura 49: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista con dirección N-S.

Fuente: Autor.



Figura 50: Cola Vehicular a 800m de Av. M. Lynch y A. Silva. Vista con dirección N-S.
Fuente: Autor.



Figura 51: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista con dirección N-S.
Fuente: Autor.



Figura 52: Cola Vehicular de 650m debido a Av. M. Lynch y S. Buzó. Vista con dirección N-S.

Fuente: Autor.



Figura 53: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista con dirección S-N.

Fuente: Autor.



Figura 54: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista nocturna en planta (1).

Fuente: Autor.



Figura 55: Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista nocturna en planta (2).

Fuente: Autor.



Figura 56: Av. M. Lynch con A. Silva. Vista nocturna en dirección O-E.

Fuente: Autor.

5.2.2 Datos de Tráfico

Conduciendo un vehículo de experimentación al mismo ritmo que el pelotón, durante las horas pico, se observa que la *velocidad media de flujo* en la Av. Madame Lynch, tanto en sentido Norte-Sur como Sur-Norte, es en media de 40 km/h, mientras que en Sinfiorano Buzó y en Alejo Silva las velocidades medias son de 30km/h, datos resumidos en la Tabla 4.

Vía	Velocidad Media (km/h)
Av. Madame Lynch	40
Calle Alejo Silva	30
Calle Sinfiorano Buzó	30

Tabla 4: Velocidad Media en Vías estudiadas.

Fuente: Adaptado de HCM (2010)

El proceso de recolección de datos de campo fue realizado en cuatro diferentes puntos dentro del área de estudio, como lo muestra la Figura 57.



Figura 57: Puntos de Recolección de Datos de Campo.

Fuente: Google Earth.

Primeramente, siguiendo normativas de la DETRAN (2014), como expuesto en el [Capítulo 2.5](#), fueron relevados los datos *Composición Vehicular* y *Volumen de Hora Pico* en el horario de pico de tarde, entre las 17:00 y 18:00, para cada una de las vías involucradas en la intersección.

Vía	N° Automóviles	N° Camiones	Volumen de Hora Pico	% automóviles	% camiones	% Volumen Total
<i>M. Lynch N-S</i>	1272	134	1406	90.5	9.5	34.3
<i>M. Lynch S-N</i>	1495	181	1676	89.2	10.8	40.9
<i>Alejo Silva E-O</i>	299	16	315	94.9	5.1	7.7
<i>Alejo Silva O-E</i>	285	17	302	94.3	5.7	7.4
<i>Sinforiano Buzó</i>	376	21	397	94.7	5.3	9.7
TOTAL GENERAL	3727	369	4096	91.0	9.0	100.0

Tabla 5: Composición Vehicular y Volumen de Hora Pico.

Fuente: Adaptado de HCM (2010)

También se contabilizó en número de ocurrencias para cada una de las posibles rutas vehiculares de las intersecciones. El resultado de dicho levantamiento de datos se contempla en la Tabla 6.

Escenario Base					
Vía	Volumen Total	Movimiento	Número de Ocurrencias	% Relativo de Ocurrencias	% Total
1: M. Lynch N-S	1406	Izquierda a A. Silva	206	14.7	100
		Derecha a A. Silva	15	1.1	
		Recto N-S	949	67.5	
		Izquierda a S. Buzó	236	16.8	
2: M. Lynch S-N	1676	Recto S-N	1573	93.9	100
		Derecha a S. Buzó	38	2.3	
		Derecha a A. Silva	7	0.4	
		Izquierda a A. Silva	58	3.5	
4: A. Silva E-O (E)	315	Derecha a M. Lynch	275	87.3	100
		Recto E-O	24	7.6	
		Izquierda a M. Lynch	16	5.1	
5: A. Silva O-E (O)	302	Izquierda a M. Lynch	104	34.4	100
		Recto O-E	96	31.8	
		Derecha a M. Lynch	102	33.8	
9: S. Buzó (E-O)	397	Izquierda a M. Lynch	384	96.7	100
		Derecha a M. Lynch	13	3.3	
TOTAL	4096				

Tabla 6: Número de Ocurrencias para cada Ruta Vehicular.

Fuente: Autor.

Este proceso de conteo fue realizado con el apoyo de las aplicaciones móviles **Rush Hour Traffic Count** para plataformas Android, **Traffic Count** (Figura 58) para iOS, y del [Contador Manual Múltiple](#). Para el efecto se contó con el apoyo de un [Equipo de Voluntarios](#).



Figura 58: Interfaz de uso de la App de conteo volumétrico Traffic Counter.

Fuente: Autor.

Cabe resaltar que se decidió no contabilizar motocicletas. Esto se debe en parte a que las mismas no generan un impacto significativo en las distancias de cola vehicular, puesto que los motociclistas transitan únicamente entre vehículos, en las laterales de las vías o inclusive sobre veredas. Este comportamiento errático resulta imposible de modelar en softwares de simulación computacional.

A efectos prácticos, para el conteo realizado, los **camiones** fueron considerados como: “todo vehículo de carga o pasajeros, cuyas dimensiones excedan considerablemente a las de un automóvil tipo (Figura 59), y cuyo eje, o ejes de tracción trasero, posean cuatro ruedas o más”. Seguidamente las Figuras 60, 61 y 62 ejemplifican casos considerados o no como camión.



Figura 59: Vehículo Automóvil Tipo.

Fuente: Autor.



Figura 60 Vehículo de Carga considerado como Camión.

Fuente: Autor.



Figura 61: Vehículo de Carga considerado como Automóvil.

Fuente: Autor.



Figura 62: Vehículo de Pasajeros considerado como Camión.

Fuente: Autor.

Adicionalmente se cronometraron los *Tiempos de Ciclo y de Fases Semafóricas* en la intersección de Av. Madame Lynch y Sinforiano Buzó, cuyos valores son mostrados en la Tabla 7:

Vía	Movimientos	Tiempo de Verde por Fase (s)
M. Lynch N-S	Recto a M. Lynch N-S	120
	Izquierda a S. Buzó	30
M. Lynch S-N	Recto a M. Lynch S-N & Derecha a S. Buzó	87
S. Buzó	Izquierda a M. Lynch N-S &	40
	Derecha a M. Lynch S-N	
Tiempo de Ciclo de la Intersección		166
Tiempo de Amarillo para cada Fase		3

Tabla 7: Tiempos Semafóricos Actuales.

Fuente: Autor.

La Figura 63 ilustra el diagrama de fases y tiempos semafóricos para la intersección en cuestión.

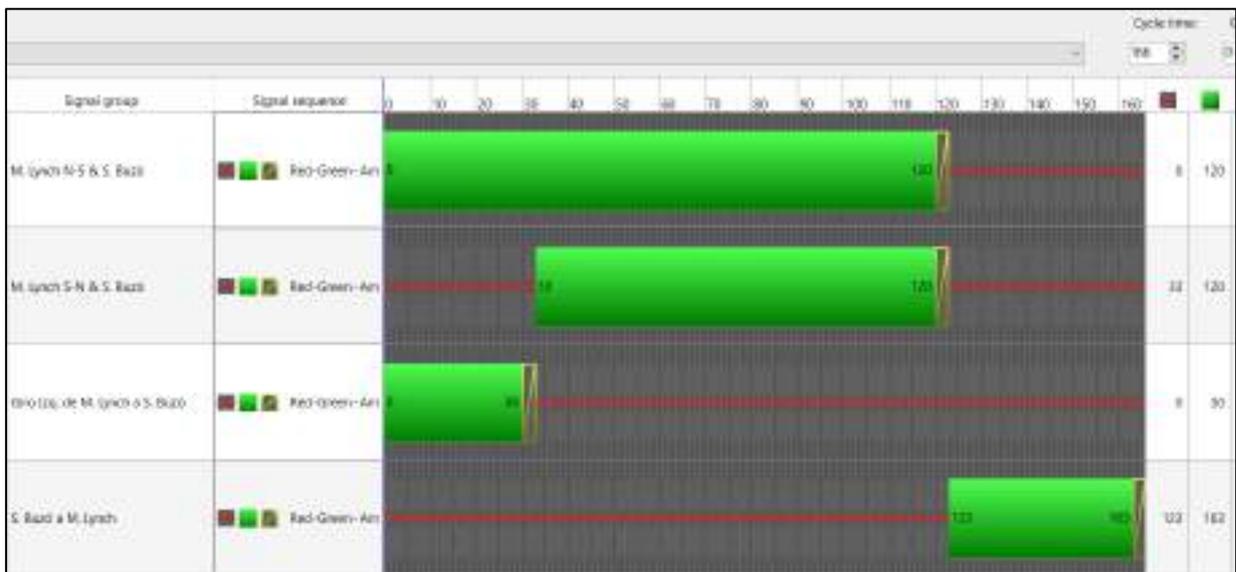


Figura 63: Diagrama de Fases Semafóricas en M. Lynch y S. Buzó.

Fuente: Software PTV Vissim.

5.3 CREACIÓN DE ESCENARIO ACTUAL EN *PTV VISSIM*

En esta sección se explicará, de manera sucinta, el proceso de operación del software *PTV Vissim* para la creación del escenario actual del área de estudio. Cabe destacar que esta sección no pretende oficiar como un manual de uso, pues escapa del alcance del proyecto. Sin embargo, pretende resumir claramente las etapas involucradas en el proceso de modelado y análisis del conjunto de intersecciones, y sus respectivas configuraciones.

5.3.1 Presentación del Software

Primeramente, en la Figura 64, se presentan las prestaciones de la licencia de uso académico que se me fue otorgada por la empresa PTV Vissim para la realización del proyecto.

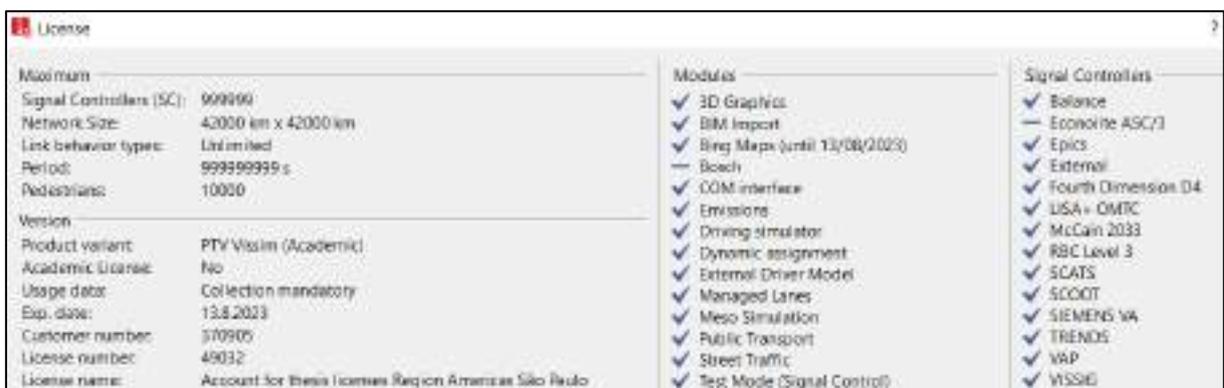


Figura 64: Prestaciones de la Licencia Académica del Software PTV Vissim.

Fuente: Autor.

Seguidamente se presenta la interfaz gráfica inicial del software *PTV Vissim* (Figura 65), desde donde se opera el proceso de configuración y modelado de la red, y su posterior análisis. Cabe destacar que, por ser un software extranjero, el idioma adoptado para su utilización es el inglés, por lo tanto, todas las figuras extraídas del mismo contendrán texto en ese idioma.

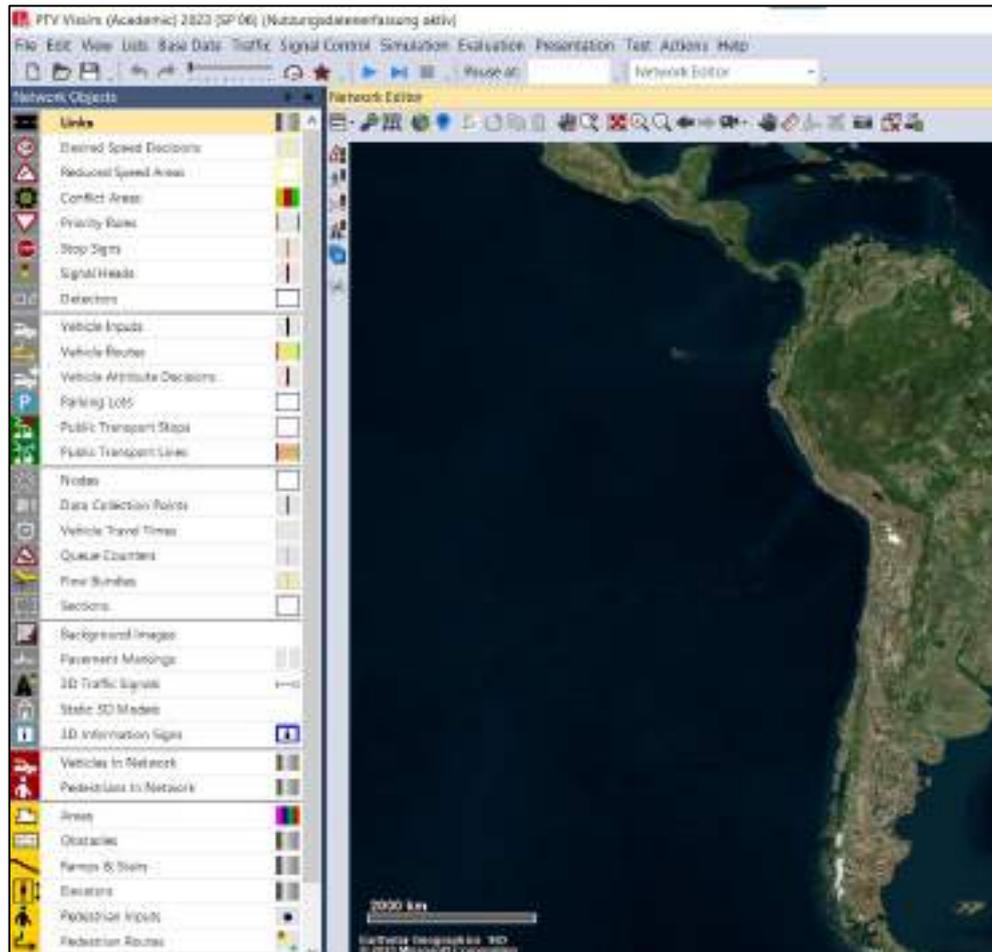


Figura 65: Interfaz Gráfica inicial en Software PTV Vissim.

Fuente: Autor

Se procede a la configuración de las unidades de medida, utilizando el sistema métrico, como muestra la Figura X66

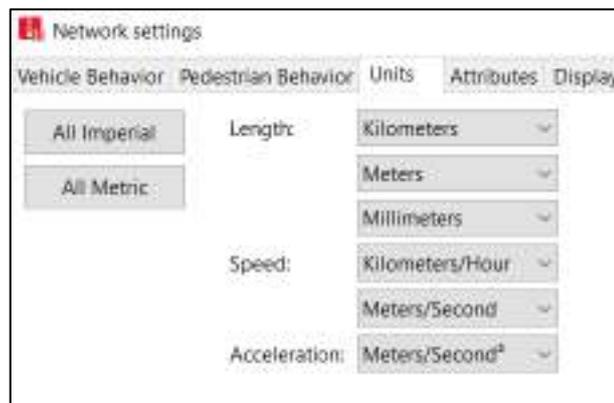


Figura 66: Configuración de Unidades de Medidas en PTV Vissim.

Fuente: Autor.

Adicionalmente, se establece que la coma (,) será utilizada como separador de unidades de mil, y el punto (.), como separador decimal.

5.3.2 Geolocalización e Imagen De Fondo

Extrayendo del Software Google Earth una imagen satelital del área de estudio y con ayuda del comando *Background Images* en PTV Vissim, se inserta la misma como base sobre la cual se establecerán todos los componentes de la modelación. Se configura la escala de la imagen y su orientación por medio del comando *set scale*. Luego se superpone con la imagen de fondo que proporciona **PTV Vissim** por *default* y se procede al siguiente paso.

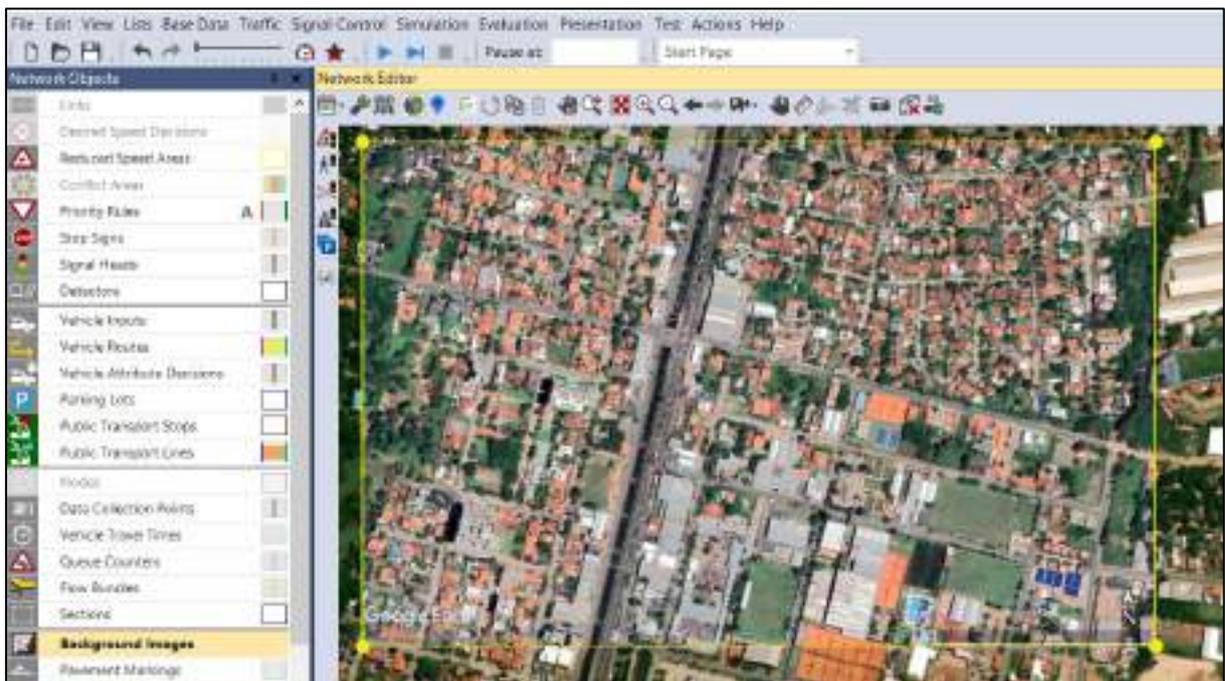


Figura 67: Inserción de Imagen de Fondo en PTV Vissim.

Fuente: Autor.

5.3.3 Vías (Links)

Utilizando el comando *LINKS* se crean los carriles de tráfico vehicular, determinando previamente los anchos de vía y número de carriles; datos obtenidos de campo. En esta etapa es importante prestar especial atención a la superposición de los carriles de la imagen de fondo con los creados por el software **PTV Vissim** para poder representar fielmente la geometría de las vías en campo.



Figura 68: Modelado de vías de tráfico en PTV Vissim.

Fuente: Autor.

Una vez creadas las vías (*links*) se procede a nombrarlas apropiadamente, de manera a poder identificarlas cuando sea analizado el desempeño de cada una. Tomando como referencia el centro de la intersección entre la Av. Madame Lynch y Alejo Silva, se nomina a cada vía adicionando al final de su nombre la dirección y sentido de aproximación con relación a los puntos cardinales. Así, la siguiente tabla expone los números de *Links* (vías), el número de carriles, y su respectiva longitud en planta.

N° de Vía	Nombre de la Vía	N° Carriles	Extensión (m)
1	M. Lynch N-S	2	1986
2	M. Lynch S-N	2	1998
3	A. Silva E-O (E)	1	671
4	A. Silva E-O (O)	1	543
5	A. Silva O-E (O) (1)	1	525
6	A. Silva O-E (O) (2)	1	26
7	A. Silva O-E (E)	1	666
8	M. Lynch S-N Carril Giro a A. Silva	1	29
9	M. Lynch N-S Carril Giro a S. Buzó	1	34
10	S. Buzó E-O	1	513
11	S. Buzó O-E	1	514
12	M. Lynch Colectora N-S	1	559
13	M. Lynch Colectora S-N	1	394

Tabla 8: Nombre de vías modeladas en PTV Vissim.

Fuente: Autor

De manera a ejemplificar las nomenclaturas adoptadas en la Tabla 8, la Figura 69 muestra el *link* 4: **A. Silva E-O (E)** siendo resaltado en color amarillo. Cabe resaltar que E-O significa que la dirección y sentido de aproximación es desde el **Este** al **Oeste**, y (E) indica que el trecho de vía se encuentra en el cuadrante **Este**, puesto que la calle **A. Silva** se extiende también al cuadrante Oeste.

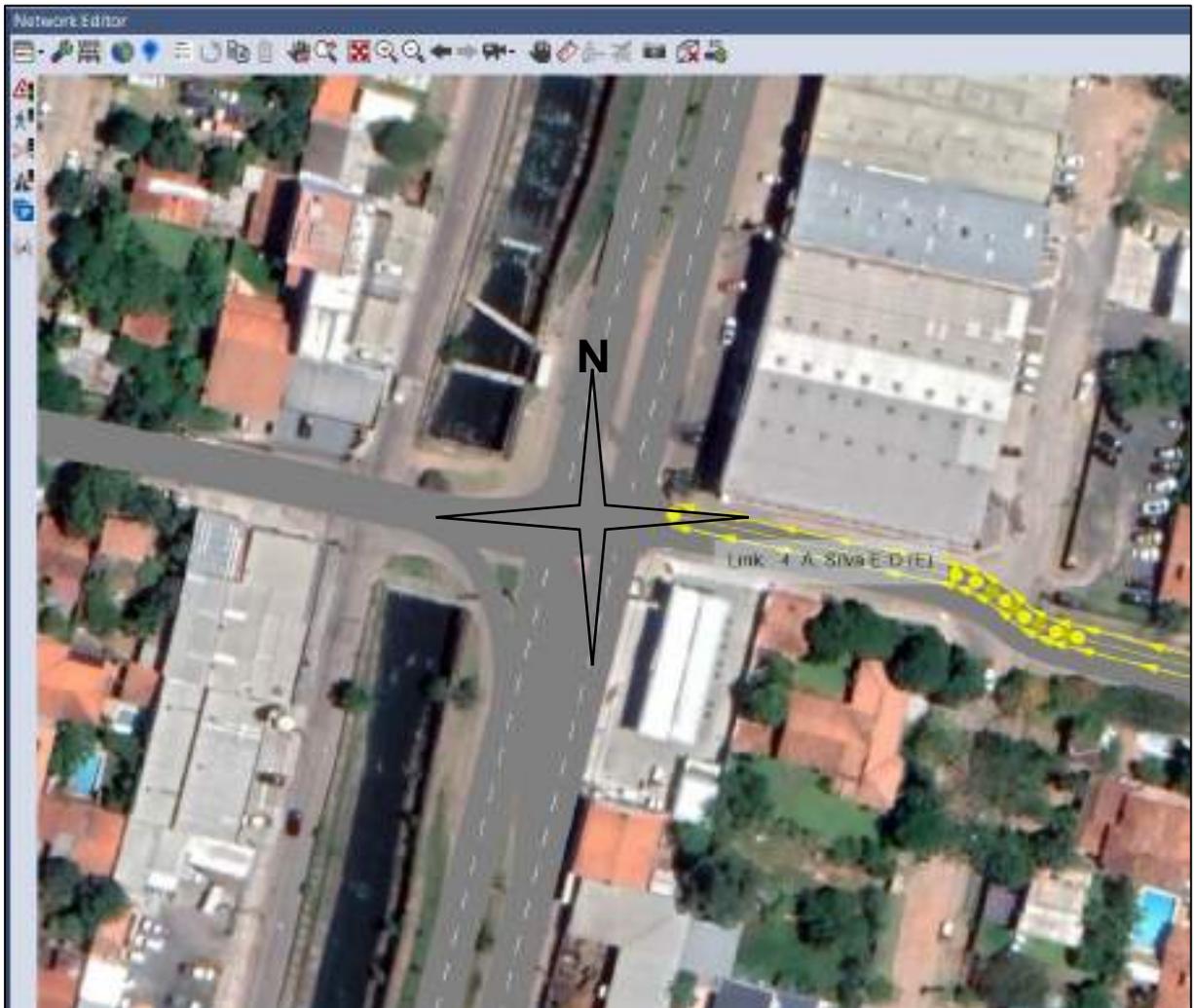


Figura 69: Ejemplo de identificación de Link en PTV Vissim.

Fuente: Autor.

5.3.4 Volúmenes Vehiculares (Vehicle Inputs)

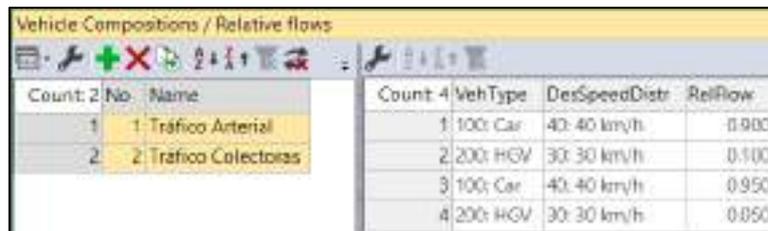
Con los datos relevados en campo, disponibles en la Tabla 5: “Composición Vehicular y Volumen de Hora Pico”, se procede a definir el flujo vehicular para cada una de las vías involucradas en el área de estudio. Este procedimiento se realiza mediante el comando *Vehicle Inputs*, como lo muestra la Figura 70, a seguir:

Vehicle inputs		Vehicle Inputs / Vehicle volumes by time interval			
Count	No	Name	Link	Volume(0-MAX) / VehComp(0-MAX)	
1	1	T: M. Lynch N-S	T: M. Lynch N-S	1400.0 1: Tráfico Arterial	
2	2	Z: M. Lynch S-N	Z: M. Lynch S-N	1070.0 1: Tráfico Arterial	
3	3	4: A. Silva E-O (E)	3: A. Silva E-O (E)	315.0 2: Tráfico Colectoras	
4	4	5: A. Silva O-E (O)	5: A. Silva O-E (O) (1)	300.0 2: Tráfico Colectoras	
5	5	9: S. Buzó E-O	10: S. Buzó E-O	297.0 2: Tráfico Colectoras	

Figura 70: Volúmenes de Tráfico en las vías.

Fuente: Autor.

Observando los datos presentados en la Tabla 5, se evidencia también que aproximadamente 10% de los vehículos que transitan por la vía arterial Av. Madame Lynch son camiones, mientras que en las demás calles colectoras los camiones representan alrededor del 5%. Esto es plasmado en el modelo por medio de la ventana *Vehicle Compositions* por medio de la columna *Rel. Flow* (flujo relativo).



Vehicle Compositions / Relative flows		
Count	No.	Name
1	1	Trafico Arterial
2	2	Trafico Colectoras

Count	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	100: Car	40: 40 km/h	0.900
2	200: HGV	30: 30 km/h	0.100
3	100: Car	40: 40 km/h	0.950
4	200: HGV	30: 30 km/h	0.050

Figura 71: Tipos de Composición Vehicular para vías arteriales y colectoras.

Fuente: Autor.

Nótese que **HGV**, en ingles *Heavy Goods Vehicle*, representa a la categoría Camiones.

5.3.5 Rutas Vehiculares (*Vehicle Routes*)

Una vez creadas todas las vías en el modelo, se procede a crear todas las posibles rutas (*vehicle routes*) que los vehículos pueden tomar al aproximarse a las intersecciones en estudio. Las rutas permitidas para movimientos vehiculares son establecidas tras las observaciones de campo, como expuestas en la Tabla 6: “Número de Ocurrencias para cada Ruta Vehicular”

Por ejemplo, para vehículos aproximándose desde Av. Madame Lynch (N-S) existen 4 posibles trayectorias, las cuales pueden visualizarse en la Figura 72, a seguir.

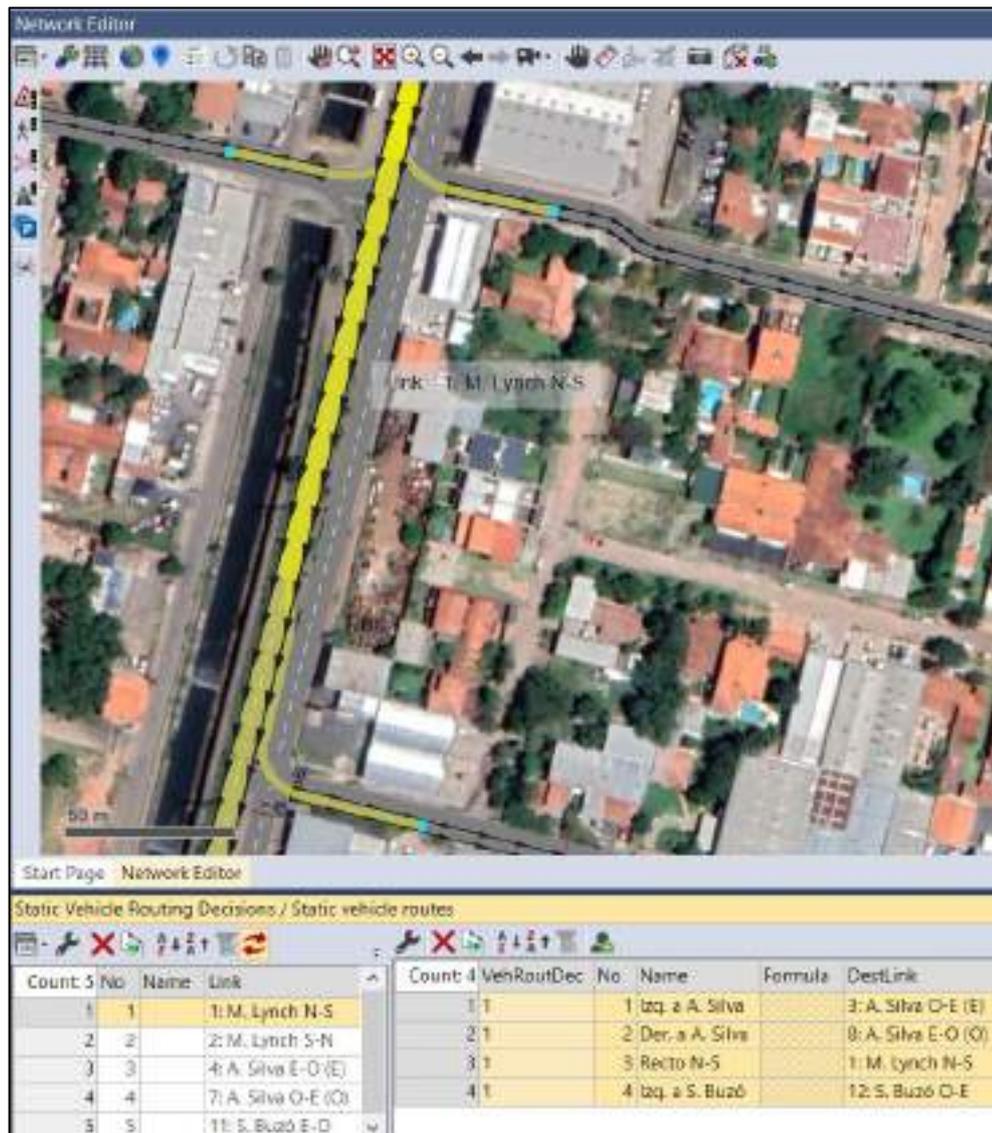


Figura 72: Rutas vehiculares para la Av. Madame Lynch N-S.

Fuente: Autor.

En total existen 5 vías desde donde los vehículos pueden iniciar su trayectoria, y un total de 16 rutas (*vehicle routes*) diferentes de destino, como lo muestra la Tabla 9:

Origen	Movimiento	
1: M. Lynch N-S	1	Izquierda a A. Silva
	2	Derecha a A. Silva
	3	Recto N-S
	4	Izquierda a S. Buzó
2: M. Lynch S-N	1	Recto S-N
	2	Derecha a S. Buzó
	3	Derecha a A. Silva
	4	Izquierda a A. Silva
4: A. Silva E-O (E)	1	Derecha a M. Lynch
	2	Recto E-O
	3	Izquierda a M. Lynch
5: A. Silva O-E (O)	1	Izquierda a M. Lynch
	2	Recto O-E
	3	Derecha a M. Lynch
9: S. Buzó E-O	1	Izquierda a M. Lynch
	2	Derecha a M. Lynch

Tabla 9: Identificación de vías origen de flujo y posibles movimientos en PTV Vissim.

Fuente: Autor

5.3.6 Áreas De Conflicto (*Conflict Areas*)

Tras la inserción de los *links* y *vehicle routes*, se procede a identificar y caracterizar cada uno de los puntos de conflicto que son generados por los movimientos que tienen lugar en la intersección entre *Av. Madame Lynch* y *Calle Alejo Silva*. Según el software PTV Vissim, incluyendo los movimientos de cruce, divergencia y convergencia, se generan 40 puntos de conflicto, que son visualizados en la Figura 73. Los mismos son generados debido al elevado número de maniobras permitidas y a la falta de semaforización.

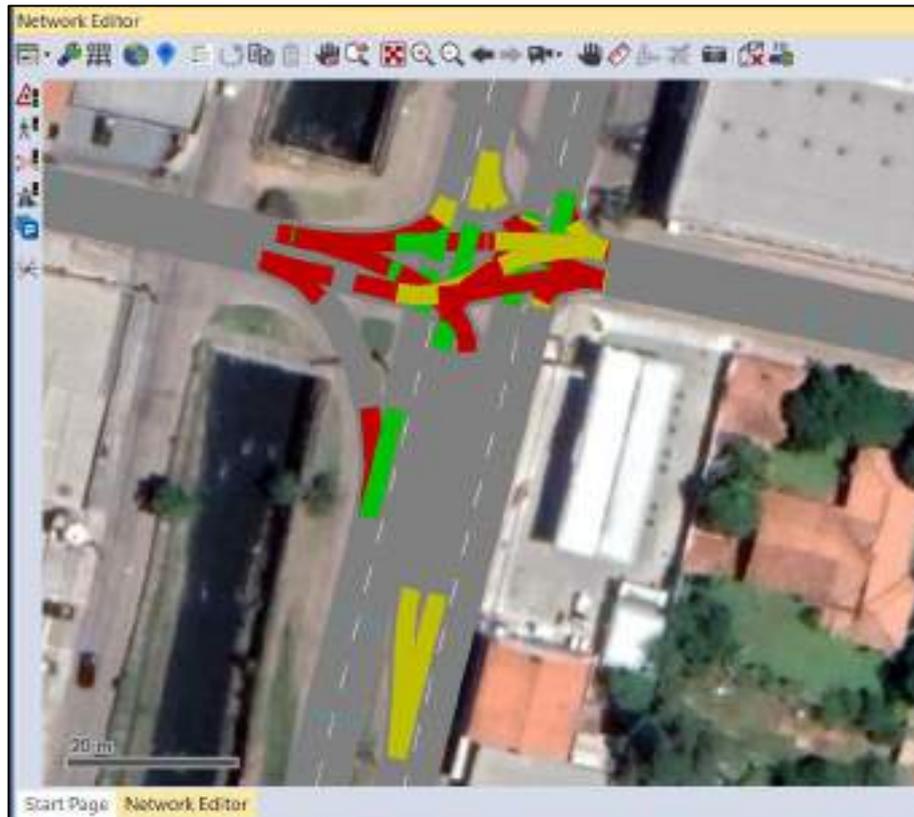


Figura 73: Áreas de Conflicto vehicular en Av. Madame Lynch N-S y Alejo Silva.

Fuente: Autor.

Es importante configurar el comportamiento vehicular en las zonas de conflicto, especialmente para *maniobras de cruce y convergencia*, puesto que ello impactará significativamente en el desempeño del modelo. Para esto, es importante observar en campo qué vías típicamente tienen preferencia de paso, y consecuentemente plasmarlo en el modelo. Una vez establecida la regla de prioridad, el software **PTV Vissim** ilustra gráficamente en color rojo a la vía que debe detenerse, en verde a la vía que tiene prioridad, y en amarillo a los conflictos cuyas reglas de paso aún no fueron definidas como ejemplificado en la Figura 74, a seguir:

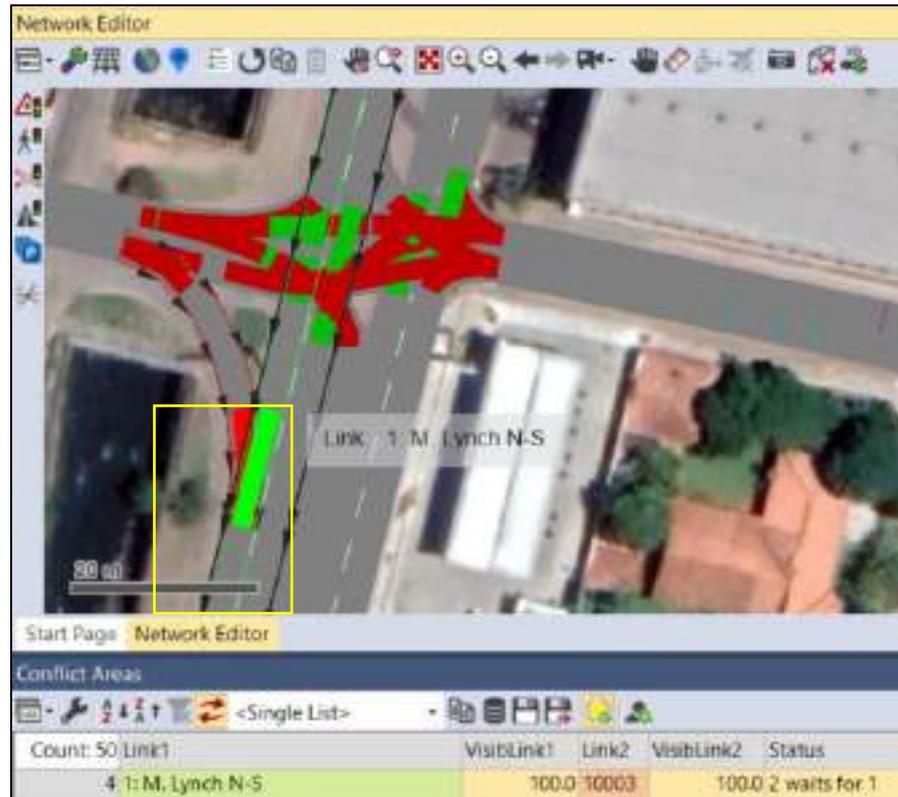


Figura 74: Área de Conflicto vehicular entre Av. Madame Lynch N-S y el giro a la derecha en Alejo Silva O-E (O).

Fuente: Autor.

En la Figura 74, se muestra que la Av. Madame Lynch, indicada en verde, posee prioridad de paso ante en giro a la derecha de la calle Alejo Silva O-E (E), indicada en rojo. Esto se explica por las diferencias intrínsecas entre una vía y la otra, ya que la Av. Madame Lynch es una vía arterial de 4 carriles, con *velocidades de flujo libre* de alrededor de 60 km/h y Alejo Silva es una vía colectora de 2 carriles con *velocidades de flujo libre* alrededor de 40 km/h, en situaciones no saturadas.

5.3.7 Calibración de Parámetros de Modelaje

Teniendo como base el funcionamiento de los simuladores de tráfico y los algoritmos de programación por detrás de ellos, presentados en el [Capítulo 3](#), *PTV Vissim* nos permite configurar un conjunto de parámetros de calibración de manera a representar el modelo con la mayor exactitud posible, teniendo como referencia el comportamiento observado en campo.

El aspecto más determinante para calibrar el modelo tiene que ver con el comportamiento de conducción (*Driving Behavior*), el cual está compuesto por varios parámetros de conducción, y tiene que ver con las decisiones que toman los conductores durante sus viajes, como lo muestra la captura de pantalla de la pestaña *Driving Behavior*, en la Figura 75 a seguir:

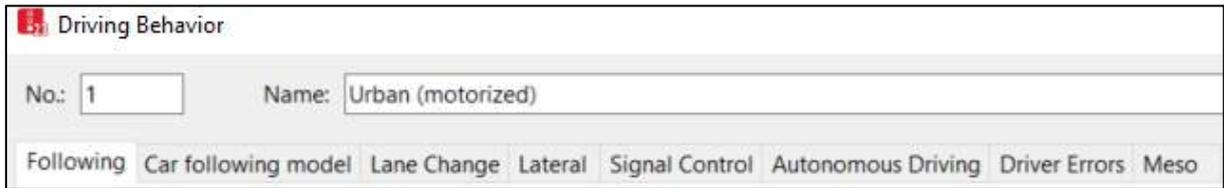


Figura 75: Parámetros de calibración del comportamiento de conducción en PTV Vissim.

Fuente: Autor.

Como observado en la Figura 75, para vías urbanas, PTV Vissim proporciona por defecto un estilo de comportamiento que busca adecuarse a patrones universales de conducción, llamado “**urban (motorized)**”. Este estilo será editado y adaptado al estilo de conducción en las vías de **Asunción, Paraguay**.

Seguidamente son expuestos, uno a uno, los parámetros y subparámetros más relevantes a ser calibrados en el software, con sus respectivas explicaciones. También, tras una exhaustiva revisión bibliográfica, se atribuyen valores a cada uno de ellos.

FOLLOWING (SEGUIMIENTO GENERAL)

En esta sección, se busca definir el comportamiento de conducción con relación a la presencia de otros vehículos y objetos en la vía, los más significativos son:

- **minimum & maximum look ahead distance** (distancia mínima y máxima de percepción frontal)
- **look back distance** (distancia de percepción trasera)
- **number of interaction vehicles and objects** (número de vehículos y objetos de interacción)

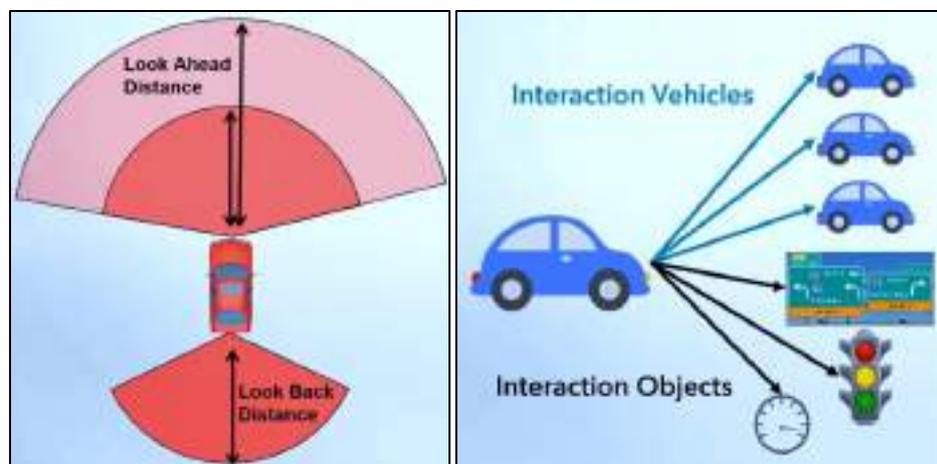


Figura 76: Ilustración de los subparámetros de seguimiento general.

Fuente: PTV America Knowledge Base (2021)

Se decide adoptar los siguientes valores para cada uno de los subparámetros de seguimiento, como lo muestra la Figura 77.

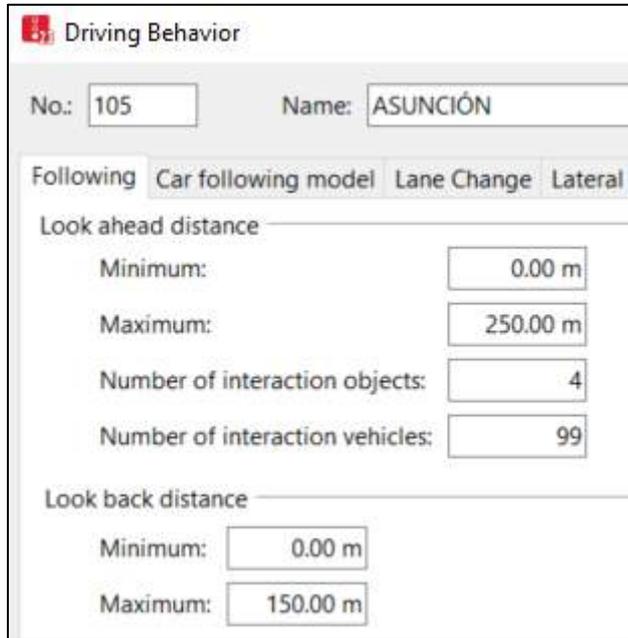


Figura 77: Valores de subparámetros de seguimiento, en PTV Vissim.

Fuente: Autor

CAR FOLLOWING MODEL (MODELO DE SEGUIMIENTO VEHICULAR)

Según Balich (2019), el modelo de seguimiento vehicular Wiedemann 74, el utilizado en este proyecto, es apropiado para contextos urbanos, mientras que Wiedemann 99 es apropiado para vías expresas sin áreas de convergencia.

Los componentes de calibración para el Modelo de Seguimiento Vehicular Wiedemann 74 son los siguientes:

ax = average standstill distance (distancia media en parada)

bx_{add} = additive part of safety distance (parte aditiva de distancia de seguridad)

bx_{mult} = multiplicative part of safety distance (parte multiplicativa de distancia de seguridad)

Los mismos están involucrados en la siguiente ecuación:

$$\text{Car Following Safety Distance } (bx) = ax + (bx_{add} + bx_{mult} * z) * \sqrt{v}$$

Donde: Z = desviación estandar $\in [0, 1]$ y v = velocidad

Ecuación 12: Car Safety Distance

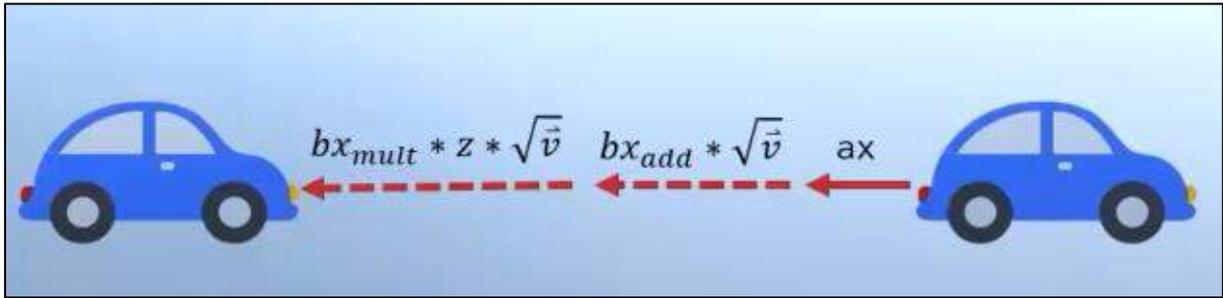


Figura 78: Ilustración de significados de la Ecuación 12.

Fuente: PTV America Knowledge Base (2021)

Según VDOT (2020) la distancia de parada, o **ax** en el modelo arterial, se refiere a la distancia deseada entre dos vehículos detenidos, medida desde el paragolpes delantero de un vehículo hasta el paragolpes trasero del siguiente vehículo. Investigaciones sugieren que el parámetro **ax** podría ajustarse durante la calibración cuando se alcanzan los umbrales de flujo, pero el atraso y la cola no alcanzan los umbrales de calibración. Las observaciones de campo deben usarse para asignar un valor **ax**, cuando disponible.

Según Prashanth et al (2020), los cambios en la distancia de parada tienen un impacto significativo en la longitud de la cola y en el tiempo de viaje.

También según VDOT (2020), la distancia de seguridad, o **bx**, es calculada en la lógica del modelo para calcular la distancia de seguimiento promedio que mantiene un vehículo mientras está en movimiento. Este parámetro se calcula con dos parámetros adimensionales **bxadd** y **bxmult**. Debido a la fuerte correlación entre estos parámetros, en investigaciones, se consideraron cambios paralelos a los valores de ambos parámetros, y los hallazgos generales sugieren que un parámetro **bx** más bajo aumenta la demora y las colas a lo largo de las arterias que se acercan a una intersección, mientras que el flujo permanece relativamente inalterado.

Según varios manuales de referencia como VDOT (2020), FDOT (2021), WisDOT (2021) y MDOT (2017), promediando valores, el rango usual para **bxadd** es de [1.5 – 3] y para **bxmult** de [2.4 – 4]. En adición a esto, en el curso virtual de capacitación sobre calibración de modelos, PTV America & MDOT (2022) afirman que la determinación de los valores **bxadd** y **bxmult** tiende a consistir en un proceso de prueba y error, hasta encontrar valores que permitan reflejar en el modelo el comportamiento real de la red observado en campo.

Así, según la Figura 79, se definen inicialmente los siguientes valores:

Driving Behavior

No.: Name:

Following **Car following model** Lane Change Lateral Signal Control Autonomous Driving

Wiedemann 74

Model parameters

Average standstill distance:

Additive part of safety distance:

Multiplic. part of safety distance:

Following behavior depending on the vehicle class of the leading vehicle:

Count	VehClass	W74ax	W74bxAdd	W74bxMult	
1	10: Car		1.00	1.50	3.00
2	20: HGV		1.00	1.50	3.00

Figura 79: Valores de subparámetros de Modelo de Seguimiento Vehicular, en PTV Vissim.

Fuente: Autor

LANE CHANGE (CAMBIO DE CARRIL)

Según PTV America Knowledge Base (2021), existen dos tipos de cambio de carril, siendo ellos *Necessary Lane Change* (Cambio de Carril Necesario) y *Free Lane Change* (Cambio de Carril Libre), representados por el vehículo rojo y blanco respectivamente, como lo expone la siguiente Figura 80.

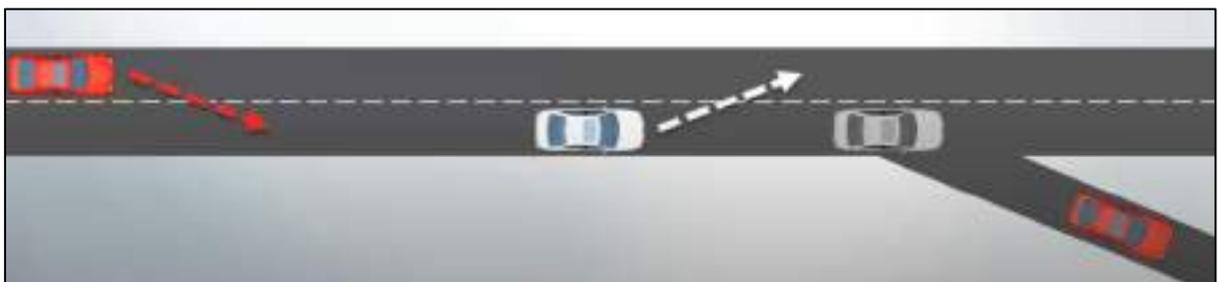


Figura 80: Ilustración de Tipos de Cambio de Carril.

Fuente: PTV America Knowledge Base (2021)

El software permite determinar comportamientos con relación a ambos tipos de decisiones de cambio de carril. Primeramente, se define el comportamiento general (*general behavior*) como siendo *Free Lane Selection* (Selección de Carriles Libres), puesto que bajo esta categorización los vehículos pueden transitar libremente en ambos carriles, sin considerar que uno de ellos está destinado exclusivamente al sobrepaso, lo cual sucede típicamente en carreteras o vías expresas bajo la categorización de *Slow Lane Rule* (Regla del Carril Lento).

El siguiente comportamiento por definir es *Necessary Lane Change (Cambio de Carril Necesario)*; este parámetro se subdivide en dos columnas, una para *own vehicle* (vehículo propio) y otra para *trailing vehicle* (vehículo seguido) y consta de tres subcomponentes.

Según Ahmed et al (2021), los umbrales de desaceleración para el vehículo propio y el vehículo seguido se definen para ajustar la agresividad del cambio de carril necesario. **Maximum Deceleration** (desaceleración máxima, valor límite superior) y **Acceptable Deceleration** (desaceleración aceptable, valor límite inferior) son los límites del valor de desaceleración al realizar un cambio de carril. El ítem “**-1 m/s² por distancia**” es la tasa de reducción que define el ritmo al que se reducirá la desaceleración máxima con el aumento de la distancia desde la distancia de parada de emergencia.

También son definidos los siguientes subparámetros, que según Ahmed et al (2021), pueden ser definidos como:

- **Waiting Time Before Diffusion:** tiempo máximo de permanencia en la red, de un vehículo, cuando este se encuentre en cola y totalmente parado. Caso un vehículo necesite realizar un cambio de carril necesario para continuar viaje, pero no tiene éxito, el mismo será removido de la simulación después de un determinado tiempo de espera.
- **Minimum Clearance:** la distancia mínima que debe existir entre dos vehículos, desde el paragolpes frontal de uno hasta el paragolpes trasero del otro, para poder realizar un cambio de carril.
- **Safety Distance Reduction Factor:** representa la reducción de las distancias de seguridad de los vehículos que intervienen en maniobras de cambio de carril. Cuanto menor este valor, más agresivo es el cambio de carril.
- **Maximum Deceleration for Cooperative Breaking:** Este subparámetro define la deceleración máxima que aceptaría un vehículo para ayudar a la maniobra de otros vehículos en el cambio de carril.
- **Cooperative Lane Change:** Al activar el parámetro de los vehículos están condicionados a identificar oportunidades para asistir a otros vehículos en la realización de maniobras de cambio de carril. Esta característica permite que un vehículo haga un cambio de carril no necesario para crear espacio para que un vehículo que se incorpore a su carril deseado.

Según PTV América & MDOT (2022), los subparámetros de comportamiento para cambios de carril necesarios más significativos según PTV América & MDOT (2022), siendo ellos: **Accepted Deceleration, Waiting Time Before Diffusion, Safety Distance Reduction Factor**, y **Cooperative Lane Change**.

Según FDOT (2020) y WisDOT (2021), los parámetros de calibración para Lane Change usualmente oscilan rangos presentados por la siguiente Tabla 10.

Rango Usual de Valores para Calibración del Parámetro Lane Change (Cambio de Carril)		
<i>Subparámetros</i>	<i>Valor Default</i>	<i>Valores Usuales</i>
Maximum Deceleration	-4 m/s^2 (own vehicle) -3 m/s^2 (trailing vehicle)	$-4.5 \rightarrow -3.6 \text{ m/s}^2$ (own vehicle) $-3.6 \rightarrow -2.4 \text{ m/s}^2$ (trailing vehicle)
-1 m/s² per distance	100 m	50 → 250 m
Accepted Deceleration	-1 m/s^2 (own vehicle) -1 m/s^2 (trailing vehicle)	$-0.75 \rightarrow -1.2 \text{ m/s}^2$ (own vehicle) $-0.45 \rightarrow -0.75 \text{ m/s}^2$ (trailing vehicle)
Waiting Time before Diffusion	60 s	Variable
Minimum Clearance	0.5 m	0.45 m → 1.85 m
Safety Distance Reduction Factor	0.6	0.1 → 0.9
Maximum Deceleration for Cooperative Braking	-3 m/s^2	$-9.5 \text{ m/s}^2 \rightarrow -0.9 < \text{ m/s}^2$
Cooperative Lane Change	Desactivado	Activado cuando existen zonas de convergencia

Tabla 10: Rango Usual de Valores para Calibración del Parámetro Lane Change

Fuente: Adaptado Tabla 7.9 de FDOT (2020) y WisDOT (2021)

Después de experimentaciones con el software, se pudo visualizar que la configuración de estos parámetros para contextos urbanos de tráfico no tiene demasiado impacto en el rendimiento del modelo, como sí lo tienen, por ejemplo, las configuraciones de *Car Following*, sin embargo, siguen siendo importantes. Así, apoyándonos en el estudio realizado por Prashanth et al (2020) para una intersección no semaforizada, y asumiendo valores promedio de manuales de calibración como FDOT (2020) y WisDOT (2021), como muestra la Figura 81, fueron configurados inicialmente los subparámetros de *Lane Change* para el modelo del proyecto.

Figura 81: Valores de subparámetros de Cambio de Carril adoptados, en PTV Vissim.

Fuente: Autor

5.3.8 Parámetros de Simulación

La configuración de los parámetros de la simulación se define en la ventana de *Simulation Parameters*, localizado en el borde superior de la interfaz gráfica de *PTV Vissim*. Los parámetros de simulación generalmente se establecen durante el desarrollo del modelo de condiciones existentes y se mantienen consistentes a través de todos los escenarios del modelo para lograr el grado deseado de coherencia en los resultados obtenidos.

Parámetros clave de simulación incluyen: ***Simulation Period***, ***Simulation Resolution***, ***Random Seed***, ***Random Seed Increment***, y ***Number of Runs***. Los mismos son descritos seguidamente según VDOT (2021):

- ***Simulation Period***: El periodo de simulación es el tiempo total de simulación del modelo, determinado en segundos de simulación. El período de simulación se determina en base a dos subperíodos diferentes: ***Seeding Period*** y ***Analysis Period***, Período de Carga del modelo y Período de Análisis, respectivamente. El Período de Carga es el tiempo requerido para que la red alcance condiciones de saturación. El Período de Análisis es el período durante el cual los objetos de evaluación del modelo registran activamente las métricas de rendimiento de la red, e incluye el ***peak hour*** (hora pico).

La siguiente Figura 82 esquematiza la composición del **Simulation Period** para una simulación



Figura 82: Esquemización del Periodo de Simulación.

Fuente: Autor

- **Simulation Resolution:** La resolución de simulación determina cuántos pasos de tiempo ocurren por segundo de simulación. Las resoluciones de simulación más altas crearán movimientos de vehículos y peatones más suaves y realistas, pero requerirán un tiempo de ejecución de simulación más prolongado. Se recomienda que la resolución de la simulación utilizada en la producción de los resultados finales de la simulación se mantenga en un mínimo de 10 pasos de tiempo por segundo de simulación.
- **Random Seed/ Random Seed Increment:** Los parámetros *Random Seed* (Semilla de Aleatoriedad) y *Random Seed Increment* (Incremento de la Semilla de Aleatoriedad) generan variaciones estocásticas de llegadas de vehículos dentro de la red de **Vissim**, lo cual ayuda a representar las variaciones en las condiciones del tráfico en el mundo real. El valor *Random Seed* inicializa un generador de números aleatorios. Dos ejecuciones de simulación usando el mismo archivo de red y mismo *Random Seed* de inicio aleatorio se verán igual; sin embargo, si el *Random Seed* varía entre dos ejecuciones del mismo archivo de red, a las funciones estocásticas se les asigna una secuencia de valores diferente, lo que cambia el flujo de tráfico dentro de la red y consecuentemente sus resultados. El *Random Seed Increment* es la diferencia entre los valores de *Random Seed* cuando se realizan múltiples ejecuciones de simulación. Por ejemplo, una red con un *Random Seed* de 100 y *Random Seed Increment* de 10, para 3 ejecuciones tendría semillas aleatorias de 100, 110 y 120 para cada una de las respectivas ejecuciones de simulación. La mejor práctica es usar una combinación consistente de valores para todos los escenarios de estudio de una misma red.
- **Number of Runs:** El número de ejecuciones determinará para cuántas *Random Seeds* se ejecutará el modelo, siempre que el *Random Seed Increment* se establezca en un valor mayor que 0. Debido al *Random Seed Increment*, en cada

ejecución aumenta el valor del *Random Seed*, lo cual generará resultados diferentes para cada ejecución realizada.

Así, siguiendo recomendaciones de VDOT (2020) son definidos los parámetros de simulación para el modelo como muestra la Figura 83.

Parameter	Value
Period	4800 s
Start time	17:00:00
Start date	12/05/2023
Simulation resolution	10
Random Seed	42
Number of runs	5
Random seed increment	1
Dynamic assignment volume increment	0.00 %

Figura 83: Valores adoptados para Parámetros de Simulación.

Fuente: Autor

5.3.9 Método de Evaluación de Desempeño

En *PTV Vissim* existen varios métodos de evaluación del desempeño de la red para la consecuente obtención de resultados de simulación. Los mismo son citados y descritos en la sección **4.1.1.2 Result Management** de VDOT (2020). Las metodologías escogida para evaluar este proyecto son: **NODES** (nodos) y **QUEUE COUNTER** (contador de cola), **TRAVEL TIMES** (tiempos de viaje) y **VEHICLE NETWORK PERFORMANCE** (desempeño de vehículos en la red).

NODES se utiliza principalmente para evaluar intersecciones, ya que ofrece flexibilidad para definir los límites de una intersección, y al mismo tiempo proporciona una variedad de Medidas de Desempeño para los vehículos que atraviesan la intersección, como por ejemplo flujo, atraso, cola, número de paradas, nivel de servicio y emisiones. Por lo general, los límites de un nodo se dibujan como un cuadro cuadrado que abarca toda el área de estudio de una intersección.

La evaluación del desempeño del modelo por **NODES** es realizada únicamente durante el periodo de análisis. Para esto, desde la pestaña *Evaluation Configuration – Result*

Attributions se realiza primeramente la elección de método de evaluación y posteriormente la definición de los tiempos.

Por ejemplo, si se desea recolectar resultados para un modelo con un **Simulation Period** de 5400 segundos, que incluye un **Seeding Period** de 1800 segundos y **Analysis Period** de 3600 segundos, se debe marcar **Collect Data** (Recolectar Datos), insertar el número 1800 en la caja *From Time (Desde)*, el número 5400 en la caja *To-Time (Hasta)* y se establecería el valor de 3600 en la caja *Interval (Intervalo)*.

Los **QUEUE COUNTERS** son otro elemento de codificación que se puede usar para medir la longitud de las colas en las rampas de las autopistas y en las intersecciones. Las colas se miden desde la posición aguas abajo del contador de colas hasta el vehículo aguas arriba más lejano que ha entrado en condiciones de cola. Los resultados de las colas se proporcionan en términos de longitud, en lugar de la cantidad de vehículos. Un contador de cola informa la longitud media de la cola, la longitud máxima de la cola y el número medio de paradas para los intervalos de tiempo definidos. La longitud máxima de la cola puede extenderse tanto para arriba como el siguiente contador de la cola o tanto como se especifique en el atributo *Longitud Máxima de la Cola*. Para capturar correctamente las colas mediante contadores de colas, los links deben ser lo suficientemente largos para dar cuenta de la longitud de cola más larga que puede ocurrir durante la simulación. Los contadores de cola solo registrarán una longitud de cola hasta el final del enlace más ascendente, por lo que cualquier cola que se extienda fuera de la red no se tendrá en cuenta por completo al informar los resultados.

El **TRAVEL TIME** se puede recopilar a través del *Travel Time Collection Segments (TTC)* (segmentos de recopilación de tiempo de viaje). Los segmentos TTC están codificados con un punto inicial y un punto final. La evaluación de segmentos TTC informa el tiempo promedio que tardan los vehículos en atravesar el segmento definido durante el intervalo de tiempo seleccionado. Los segmentos de tiempo de viaje no se pueden desarrollar directamente para representar rutas específicas a través de la red (es decir, solo se consideran los vehículos que pasan tanto por el punto de partida como por el de parada). En última instancia, estos segmentos deben codificarse para que coincidan con los segmentos de tiempo de viaje recopilados en el campo para una comparación directa durante la calibración.

El **VEHICLE NETWORK PERFORMANCE** puede evaluar capturando el retraso promedio, el número de paradas, la distancia recorrida, el rendimiento vehicular, la demanda latente y el consumo de combustible. Esta característica se usa normalmente para comparar diferentes escenarios de red a un alto nivel.

Así, siguiendo las recomendaciones de VDOT (2020), se establecen las configuraciones para el método de evaluación del modelo, como ilustra la Figura 84.

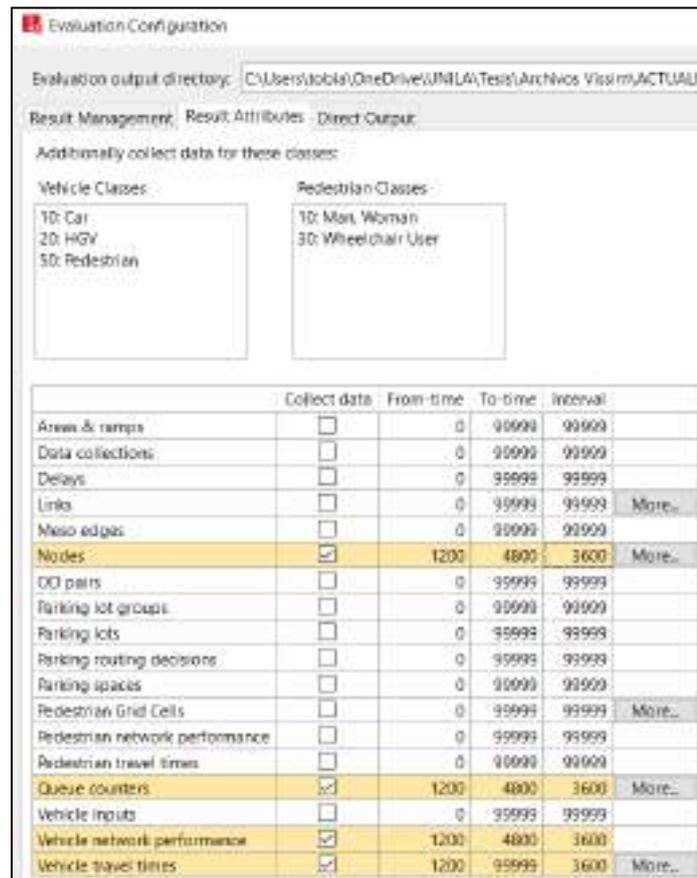


Figura 84: Configuración de Métodos de Evaluación de Desempeño.

Fuente: Autor

5.3.10 Validación de Resultados de Simulación

VDOT (2021) define la validación de la red como siendo el proceso durante el cual el modelador chequea el rendimiento esperado del tráfico del modelo, contrastándolo con métricas obtenidas de campo que no fueron utilizadas para la calibración.

Lo que se busca en esta etapa es validar la calibración del modelo, es decir, verificar que los parámetros de calibración configurados arrojan resultados de desempeño similares a la realidad, utilizando como métricas observaciones de campo. Como se ilustra en la Figura 31 de la sección [CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN](#), cuando el modelo no cumple con los niveles de desempeño esperados, se procede a la recalibración del mismo.

Los niveles de desempeño, u **Objetivos de Calibración de Modelos**, observados en [Anexo 8.3](#) son lineamientos teóricos que buscan limitar las divergencias existentes entre los resultados obtenidos por la simulación y las observaciones de campo, para la aceptación del modelo como válido.

Con base en modelados y análisis realizados por **PTV Group**, para este proyecto se decide contrastar el Volumen de Tráfico, con las observaciones de campo, **mediante GEH Statistics**, como parámetro de **validación** del modelo.

5.4 RESULTADOS DEL ESCENARIO ACTUAL

Seguidamente se presentan imágenes del estado de las intersecciones en estudio durante el proceso de simulación y calibración del modelo, también comentarios relacionados a ellos, y posteriormente los resultados en formato de tablas, de las medidas de desempeño.

5.4.1 Proceso de Calibración del Modelo

Como muestra la Figura 85, inicialmente el modelo diseñado en PTV Vissim caía en situaciones de saturación total, donde vehículos bloqueaban las calles y el flujo era totalmente interrumpido de manera casi permanente. Estos escenarios no reflejan el comportamiento real de la intersección, puesto que, a pesar de ocasionalmente existir bloqueos totales de todas las vías, los conductores consiguen maniobrar y continuar sus rutas.



Figura 85: Comportamiento impreciso del modelo base en Av. M. Lynch con A. Silva.

Fuente: Autor

La situación ilustrada anteriormente se debe a que la intersección de Av. Madame Lynch y Alejo Silva es intrínsecamente caótica, se evidenció durante las visitas de campo que las reglas de prioridad de paso son inconsistentes en el transcurso de la hora pico. Así, calibrar el modelo, de una manera que más o menos se comporte como la realidad presentó un verdadero desafío.

Alterando parámetros de calibración como, por ejemplo, las reglas de prioridad de paso (*priority rules*), el comportamiento vehicular (*driving behavior*) ante puntos de conflicto, y el *waiting time before diffusion* se consiguió un modelo cuyas medidas de desempeño se encuadran dentro de márgenes de tolerancia en términos de criterios de validación.

Así, se consiguió obtener un modelo que se comporta de manera más fluida, con tiempos de espera y distancias de cola similares a las observadas en campo. Las siguientes imágenes ilustran momentos durante la simulación del modelo, con su respectivo horario.

Cabe resaltar que el modelo corre desde las 17:00 hasta las 18:20, incluyendo el periodo de calentamiento o *seeding period* de 20 minutos, y un periodo de análisis de 1h.

5.4.2 Imágenes del comportamiento del Modelo Base en PTV Vissim

Seguidamente se exponen imágenes del estado del modelo base, durante el transcurso de la simulación:



Figura 86: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista E-O (1).

Fuente: Autor



Figura 87: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista S-N (1).

Fuente: Autor



Figura 88: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista S-N (2).

Fuente: Autor



Figura 89: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista E-O (2).

Fuente: Autor



Figura 90: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista S-N (3).

Fuente: Autor



Figura 91: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con A. Silva. Vista N-S.

Fuente: Autor



Figura 92: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista N-S (1).

Fuente: Autor



Figura 93: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista S-N (1).

Fuente: Autor

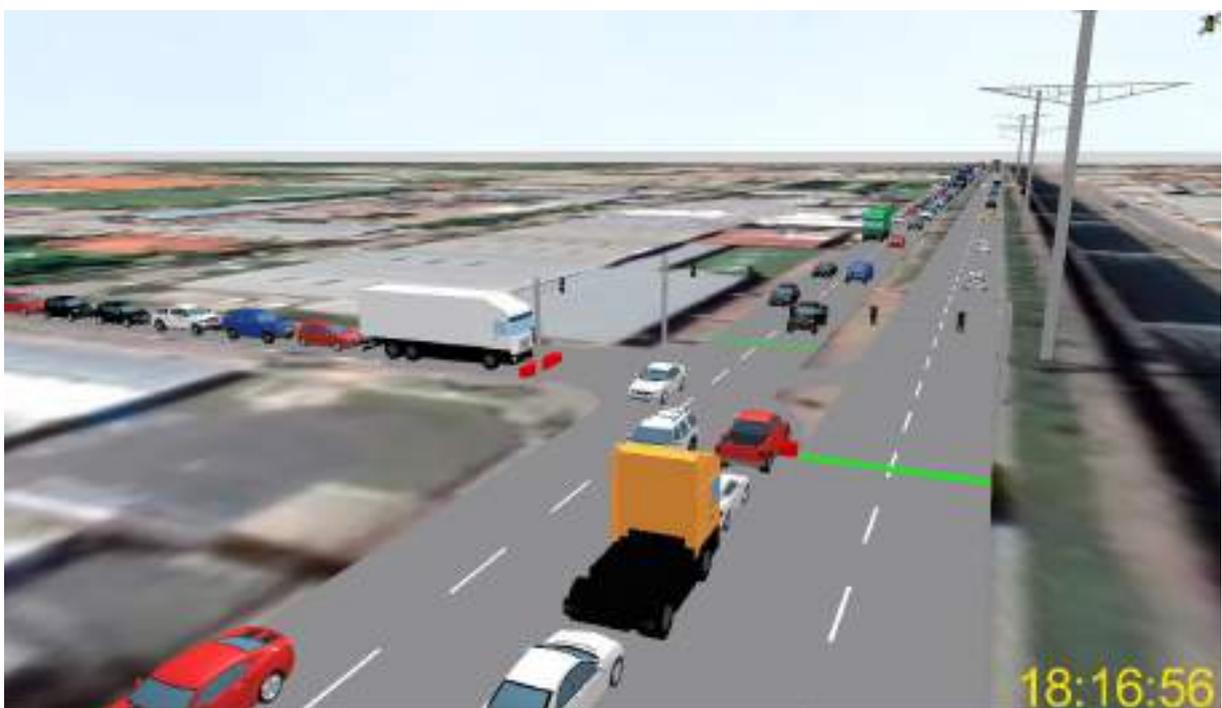


Figura 94: Comportamiento del modelo en Av. M. Lynch con S. Buzó. Vista N-S (2).

Fuente: Autor

5.4.3 Resultados de Medidas de Desempeño del Modelo Base

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos utilizando los [4 diferentes métodos de evaluación de desempeño](#) explicitados anteriormente en este trabajo, tras realizar 5 simulation runs.

Resultados de VEHICLE PERFORMANCE NETWORK

Número de Simulación	Atraso (Promedio) (s)	Paradas (Promedio)	Velocidad (Promedio) (km/h)	Tiempo Parado (Promedio) (s)	Tiempo Total de Viaje (Average) (s)	Atraso Total (s)	Paradas Totales	Total de Tiempo Parado (s)	Vehículos Ingresados	Vehículos en Espera
Simulation Run	Delay (Average) (s)	Stops (Average)	Speed (Average) (km/h)	Delay Stopped (Average) (s)	Total Travel Time (Average) (s)	Delay Total (s)	Total Stops	Total Delay Stopped (s)	Vehicles Arrived	Vehicles on demand
1	445	15.6	9.1	332	2411182	1865640	65473	1391803	3407	235
2	362	11.5	10.9	276	2110400	1539831	48809	1175306	3507	183
3	482	16.2	8.7	361	2617471	2051868	69016	1537273	3465	365
4	389	11.1	10.4	303	2239285	1660852	47159	1294067	3537	175
5	454	17.2	9.1	332	2527308	1957742	74231	1430670	3515	236
PROMEDIO	426	14.3	9.6	321	2381129	1815186	60938	1365824	3486	239
DESVIACIÓN EST.	49	2.8	0.9	32	207089	211262	12242	137587	51	76
MÍNIMOS	362	11.1	8.7	276	2110400	1539831	47159	1175306	3407	175
MÁXIMOS	482	17.2	10.9	361	2617471	2051868	74231	1537273	3537	365

Tabla 11: Resultados de Vehicle Performance Network para el Modelo Base.

Fuente: Autor

Seguidamente se describe cada una de las medidas de desempeño:

- **Delay (Average):** Atraso Promedio por Vehículo. El Atraso se define como el tiempo de viaje **adicional** experimentado por un conductor, pasajero, ciclista o peatón para desplazarse de un lugar a otro a la velocidad deseada, a causa del congestionamiento de la vía.
- **Stops (Average):** Paradas Promedio por vehículo. Número de veces que un vehículo se detiene completamente en la vía.
- **Speed (Average):** Velocidad Promedio de Viaje de todos los vehículos de la red.
- **Delay Stopped (Average):** Tiempo Parado Promedio por Vehículo.
- **Total Travel Time (Average):** Tiempo Total de Viaje. Suma de todos los tiempos de viaje de los vehículos en la red.
- **Delay Total:** Atraso Total Promedio. Suma del Atraso de todos los vehículos de la red.
- **Total Stops:** Paradas Totales. Suma de todas las paradas de los vehículos de la red.
- **Total Delay Stopped:** Tiempo Total Parado. Suma los tiempos parados de todos los vehículos.
- **Vehicles Arrived:** Número de Vehículos ingresados a la red.
- **Vehicles on Demand:** Número de Vehículos en espera para ingresar a la red.

Resultados de QUEUE COUNTERS

<i>Vía de conteo</i>	<i>Intervalo de Análisis</i>	<i>Distancia de Cola Promedio (m)</i>	<i>Distancia de Cola Máxima (m)</i>	<i>Número de Paradas</i>
Link	Time Interval	Average Queue Counter (m)	Max. Queue Counter (m)	Queue Stops
M. Lynch N-S	1200-4800	700	1088	9999
M. Lynch S-N	1200-4800	911	1062	6775
A. Silva E-O	1200-4800	526	673	2070
A. Silva O-E	1200-4800	341	512	1426
S. Buzó	1200-4800	432	516	1761

Tabla 12: Resultados de Queue Counters para el Modelo Base**Fuente: Autor****Resultados de TRAVEL TIMES**

<i>Vía de conteo</i>	<i>Intervalo de Análisis</i>	<i>Vehículos Contabilizados</i>	<i>Tiempo Promedio de Viaje</i>	<i>Distancia Recorrida</i>
Link	Time Interval	Vehicles Recorded	Average Travel Time	Distance Traveled
M. Lynch N-S	1200-4800	1072	391	1000
M. Lynch S-N	1200-4800	1364	395	1000
A. Silva O-E	1200-4800	142	743	455
A. Silva E-O	1200-4800	226	1009	568
S. Buzó	1200-4800	299	683	526

Tabla 13: Resultados de Travel Times para Modelo Base.**Fuente: Autor**

Resultados de **NODES**

Vía de Origen	Movimiento / Destino	Atraso Promedio (s)	Nivel de Servicio	Valor de Nivel de Servicio
		Average Delay (s)	LOS	LOS Value
M. Lynch N-S	Recto a M. Lynch N-S	309	F	6
	Izquierda a A. Silva E-O	238	F	6
	Derecha a A. Silva O-E	456	F	6
	Izquierda a S. Buzó	522	F	6
M. Lynch S-N	Recto a M. Lynch S-N	335	F	6
	Derecha a A. Silva e-o	380	F	6
	Izquierda a A. Silva O-E	341	F	6
	Derecha a S. Buzó	310	F	6
A. Silva E-O	Izquierda a M. Lynch N-S	1091	F	6
	Derecha a M. Lynch S-N	1013	F	6
	Recto a A. Silva O-E	1048	F	6
A. Silva O-E	Izquierda a M. Lynch S-N	1021	F	6
	Derecha a M. Lynch N-S	912	F	6
	Recto a A. Silva E-O	1000	F	6
S. Buzó	Izquierda a M. Lynch N-S	637	F	6
	Derecha a M. Lynch S-N	675	F	6
PROMEDIO GENERAL		441	F	6

Tabla 14: Resultados de Nodos para Modelo Base.

Fuente: Autor

5.4.4 Validación del Modelo Base con GEH Statistics

Para aceptar como válida la red modelada, como explicado en la sección de [validación](#), se procede a realizar el cálculo del indicador GEH.

Volumen de Tráfico (veh/h)		Diferencia Porcentual (%)	índice GEH
PTV Vissim <i>(obtenido de vehicle network performance)</i>	Campo		
3486	4096	17.50	9.91

Tabla 15: Validación GEH.

Fuente: Autor

La obtención de un valor inferior a 10 indica que el modelo, a pesar de estar aún lejos de replicar exactamente el comportamiento real de la red, aún puede ser considerado como aceptable, especialmente considerándose que se trata de una intersección no semaforizada sobresaturada.

5.5 PROPUESTA DE INTERVENCIÓN EN LA INTERSECCIÓN

5.5.1 Análisis de Situación Actual

Habiendo observado los resultados de la simulación del escenario base, y complementándolos con datos y observaciones de campo, se evidencia que el núcleo de la causa de la congestión vehicular generalizada tiene lugar en la intersección entre *Av. Madame Lynch* y *Alejo Silva*. Son llevados en consideración los siguientes puntos críticos para proponer una intervención:

1. La cola sobre *Av. Madame Lynch* N-S con *Alejo Silva* es generada principalmente por el elevado número de giros a la izquierda, que, al realizarse, impiden el flujo libre de vehículos que desean desplazarse en línea recta. Por lo tanto, éstos resultan atascados en el carril izquierdo, el cual no está proyectado para ser un carril exclusivo de giro, sino un carril de tránsito rápido.
2. Al no existir semaforización en ninguna de las vías involucradas, debido al alto volumen de tráfico en todas ellas, se genera un caos generalizado que atasca el paso. Se nota principalmente la dificultad de paso en las maniobras de cruce con *Av. Madame Lynch*. En contrapartida, las maniobras de giro a la derecha, tanto en *Alejo Silva* como en *Av. Madame Lynch* resultan menos conflictivas, y más fluidas.
3. Cuando se generan atascos en un carril específico de *Av. Madame Lynch*, los vehículos del otro carril tienden a disminuir considerablemente la velocidad, debido a cambios de carril forzados en la misma. Esto permite a los vehículos procedentes de *Alejo Silva*, incursionar en sus maniobras de cruce de manera osada, y riesgosa, posicionándose en medio de la intersección, a la espera de poder finalizar el cruce. Este es el movimiento que más riesgo de accidentes genera.
4. Cuando los vehículos permanecen en el medio de la intersección, a la espera del momento oportuno para cruzar, generan el bloqueo de otros posibles movimientos, como por ejemplo el giro a la izquierda de *Av. Madame Lynch* S-N a *Alejo Silva*.
5. Los vehículos procedentes de *Alejo Silva* O-E, a pesar de transitar en una vía de un solo carril, debido a la disponibilidad de espacio en la inminencia del cruce con *Av. Madame Lynch*, se agrupan en dos carriles, o inclusive en tres, bloqueando otras posibles maniobras que puedan tener lugar, como el giro a la derecha de *Av. Madame Lynch* N-S a *Alejo Silva*.

Las siguientes imágenes capturadas por dron buscan complementar a las imágenes obtenidas por medio de la simulación en la sección anterior, y justificar las apreciaciones hechas sobre las problemáticas a ser resueltas.



Figura 95: Estancamiento de vehículos en el espacio central de cruce en Av. Madame Lynch y Alejo Silva O-E.

Fuente: Autor



Figura 96: Obstrucción total de Av. Madame Lynch N-S por parte de vehículos oriundos de A. Silva O-E.

Fuente: Autor



Figura 97: Bloqueo de espacio de Giro para vehículos oriundos de Av. M. Lynch S-N con destino a A. Silva O-E (2).

Fuente: Autor



Figura 98: Sobreocupación del Carril de salida de A. Silva O-E

Fuente: Autor

5.5.2 Propuestas de Modificaciones a la Red Vial

La propuesta elaborada en este proyecto para subsanar la congestión vehicular en el horario pico de tarde tiene como pilares principales los siguientes asuntos

- *Implementación de pares binarios de tránsito:* cambio de sentidos de circulación en calles.
- *Movimientos vehiculares y peatonales optimizados:* *eliminación de giros a la izquierda no semaforizados*, modificación de fases semaforicas existentes y creación de fases nuevas.
- *Aprovechamiento de espacio vial disponible para el tránsito.*

Cabe reiterar que el objetivo de esta propuesta es servir a la administración pública correspondiente como una alternativa eficiente de gestión de tráfico; de bajo costo, alto impacto, y sencilla ejecución, que tiene como propósitos reducir los atrasos en tiempos de viaje y mejorar la seguridad vial multimodal del área de estudio.

Seguidamente se ejemplifican e ilustran las modificaciones realizadas al modelo base:

1. Eliminación de Giros a la Izquierda y Semaforización en Av. M. Lynch

Se insertan semáforos con tiempos de ciclo optimizados, en ambos sentidos de circulación de la Av. Madame Lynch en su intersección con Alejo Silva.



Figura 99: Propuesta Modelada en Av. M. Lynch y A. Silva (1)

Fuente: Autor

La semaforización elimina los giros a la izquierda en cualquier dirección de viaje de la Av. M. Lynch. Se destina una fase exclusiva a peatones atravesando M. Lynch, y se colocan señalizaciones indicativas verticales y horizontales.



Figura 100: Propuesta Modelada en Av. M. Lynch y A. Silva (2)

Fuente: Autor

2. Cambio de Sentido y Semaforización de la Calle Alejo Silva E-O (E)

La *Calle Alejo Silva*, procedente del cuadrante este, que en la actualidad es una vía de doble sentido con carriles únicos, se convierte una vía de un único sentido de circulación (E-O), sirviendo como vía de entrada a la ciudad de Asunción.



Figura 101: Propuesta Modelada en A. Silva y M. Lynch (1)

Fuente: Autor

Adicionalmente, se insertan semáforos vehiculares con tiempos de fase optimizados para la demanda a la cual están sujetas, y semáforos peatonales de fases exclusivas en ambos lados de la calle.



Figura 102: Propuesta Modelada en A. Silva y M. Lynch (2)

Fuente: Autor

3. Cambio de Sentido y Semaforización de la Calle Sinfiorano Buzó

La Calle Sinfiorano Buzó, que también actúa como una vía de doble sentido de circulación, es modificada de manera a ser de un solo sentido (O-E), sirviendo como una vía de salida de la ciudad de Asunción.



Figura 103: Propuesta Modelada en M. Lynch y S. Buzó (1)

Fuente: Autor

Al convertir S. Buzó en una calle de un solo sentido, se elimina el movimiento de cruce desde S. Buzó a M. Lynch N-S, consecuentemente deja de ser necesario el semáforo sobre M. Lynch N-S que controla el para avance en línea recta. Sin embargo, permanecen los semáforos sobre M. Lynch S-N y sobre el carril exclusivo de giro a S. Buzó. Para ellos se establecen nuevos tiempos de fases.



Figura 104: Propuesta Modelada en M. Lynch y S. Buzó (2)

Fuente: Autor

También se extiende la longitud del carril exclusivo de giro de Av. M. Lynch N-S con dirección a S. Buzó, pasando de 35 metros a 150 metros.



Figura 105: Propuesta Modelada en M. Lynch y S. Buzó (3)

Fuente: Autor

4. Semaforización de Alejo Silva O-E.

La Calle A. Silva O-E permanece de doble sentido de circulación, con un carril por sentido. Se adicionan dos semáforos a la misma, uno antes de la intersección con la colectora, y otro en la inminencia del cruce con Av. Madame Lynch.



Figura 106: Propuesta Modelada en A. Silva O-E y Av. M. Lynch (1)

Fuente: Autor

En el tramo de calle más próximo a Av. M. Lynch, se ensancha la vía a dos carriles, puesto que es el uso que adopta cotidianamente. Se potencia el uso del carril exclusivo a de giro a la derecha, que también responde a la semaforización.

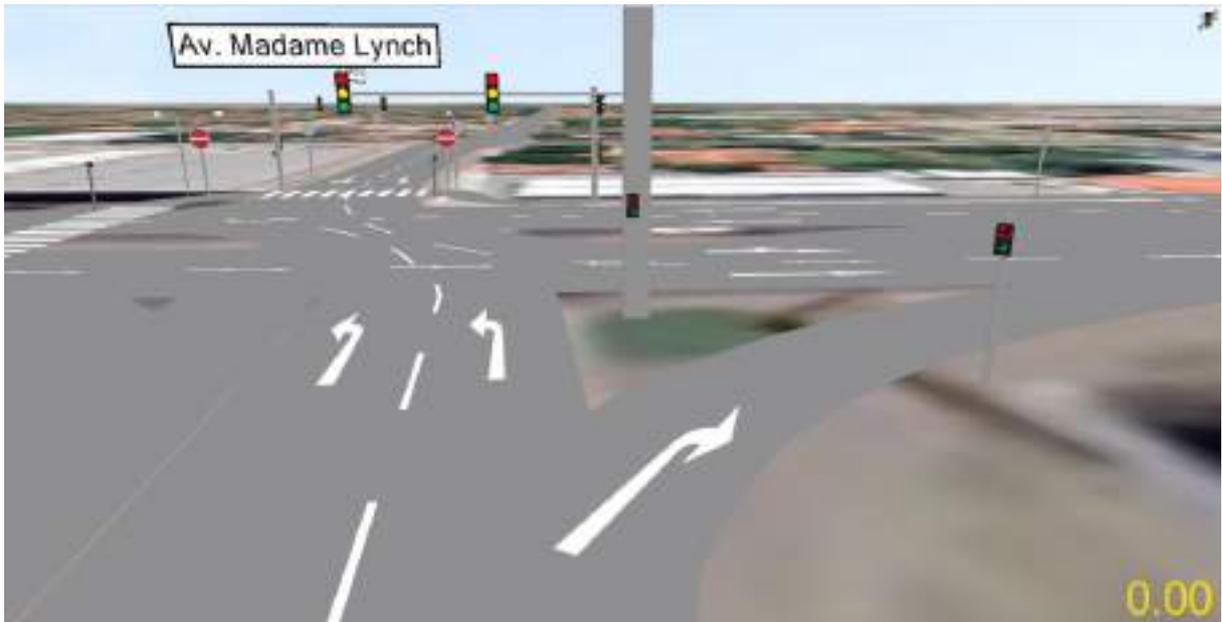


Figura 107: Propuesta Modelada en A. Silva O-E y Av. M. Lynch (2)

Fuente: Autor

5. Pavimentación de Calle Salvador Bogado

Con el objetivo de interconectar el par binario de tránsito Alejo Silva E-O y Sinfiorano Buzó O-E, se propone pavimentar la calle Salvador Bogado. Esta permitirá que vehículos que anteriormente realizaban giros a la izquierda sobre Av. Madame Lynch S-N puedan dirigirse a su destino, Alejo Silva O-E, pero encaminados por otra calle, mediante intersección semaforizada.



Figura 108: Propuesta Modelada entre S. Buzó y A. Silva E-O

Fuente: Autor

Con las alteraciones propuestas, el nuevo flujo de tráfico en el área de estudio está compuesto de la siguiente manera:

Propuesta					
Vía	Volumen Total	Movimiento	Número de Ocurrencias	% Relativo de Ocurrencias	% Total
1: M. Lynch N-S	1406	Izquierda a A. Silva	0	0.0	100
		Derecha a A. Silva	15	1.0	
		Recto N-S	949	67.5	
		Izquierda a S. Buzó	442	31.4	
2: M. Lynch S-N	1676	Recto S-N	1573	93.9	100
		Derecha a S. Buzó	45	2.7	
		Derecha a A. Silva	0	0.0	
		Izquierda a A. Silva Via S. Bogado	58	3.5	
4: A. Silva E-O (E)	712	Derecha a M. Lynch	288	40.4	100
		Recto E-O	24	3.4	
		Izquierda a M. Lynch	400	56.2	
5: A. Silva O-E (O)	302	Izquierda a M. Lynch	104	34.4	100
		Recto O-E	0	0.0	
		Derecha a M. Lynch	198	65.6	
9: S. Buzó (E-O)	0	Izquierda a M. Lynch	0	0.0	0
		Derecha a M. Lynch	0	0.0	
TOTAL	4096				

Tabla 16: Flujos de Tráfico para el Modelo Propuesto.

Fuente: Autor

Seguidamente, se complementa la justificación de la propuesta de intervención con la exposición del diagrama de fases semafóricas, mostrado en la Figura 109, calculado para despejar de la manera más eficiente el caudal de tráfico que es demandado para cada una de las vías involucradas.

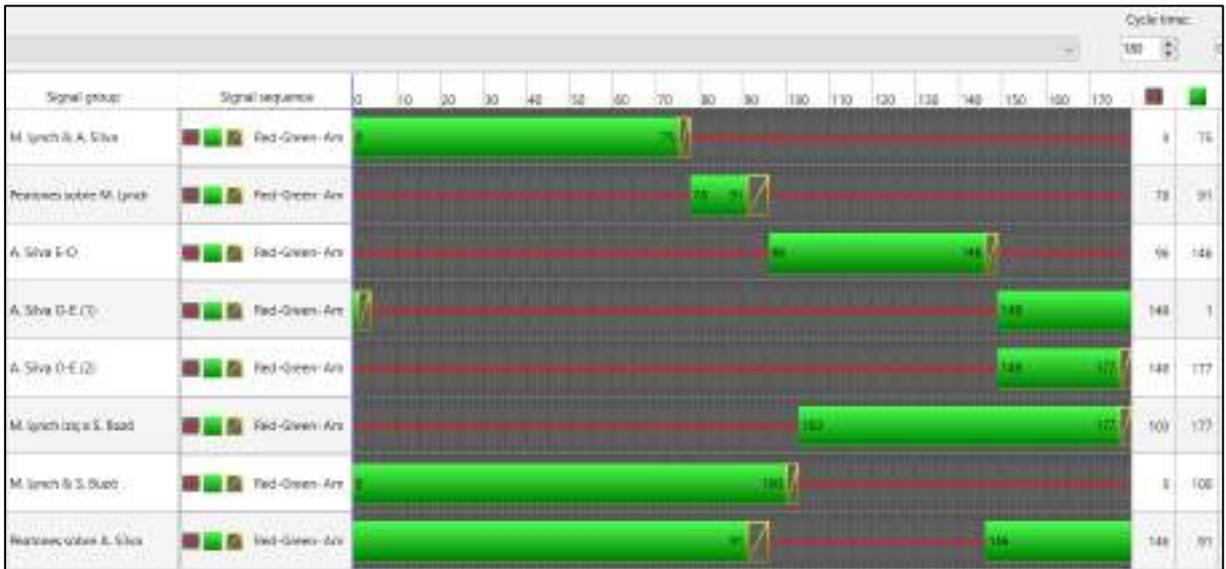


Figura 109: Diagrama de Fases del modelo propuesto.

Fuente: Autor

5.5.3 Imágenes del Comportamiento de la Propuesta en PTV VISSIM



Figura 110: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (1).

Fuente: Autor



Figura 111: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (2).

Fuente: Autor



Figura 112: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (3).

Fuente: Autor



Figura 113: Comportamiento de la propuesta en Salvador Bogafo y A. Silva E-O.

Fuente: Autor



Figura 114: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (4).

Fuente: Autor



Figura 115: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (5).

Fuente: Autor



Figura 116: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (6).

Fuente: Autor



Figura 117: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (7).

Fuente: Autor



Figura 118: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (8).

Fuente: Autor



Figura 119: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (9).

Fuente: Autor



Figura 120: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y A. Silva (10).

Fuente: Autor



Figura 121: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (1).

Fuente: Autor



Figura 122: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (2).

Fuente: Autor



Figura 123: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (3).

Fuente: Autor



Figura 124: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (4).

Fuente: Autor

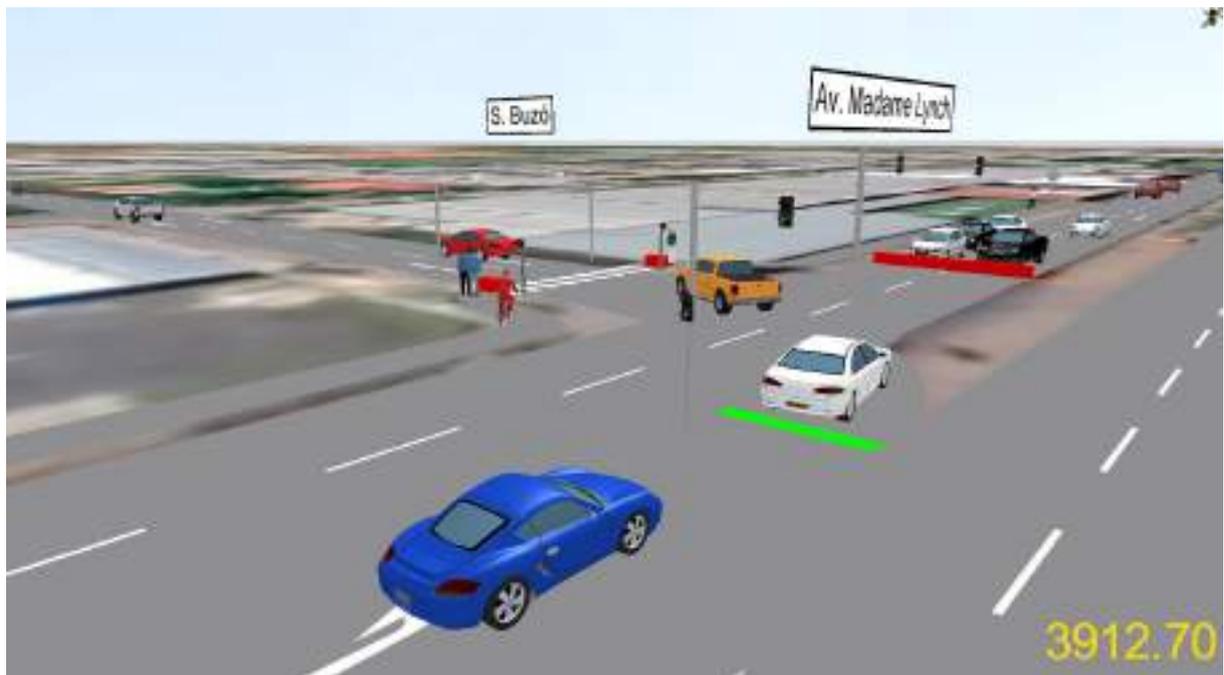


Figura 125: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (5).

Fuente: Autor

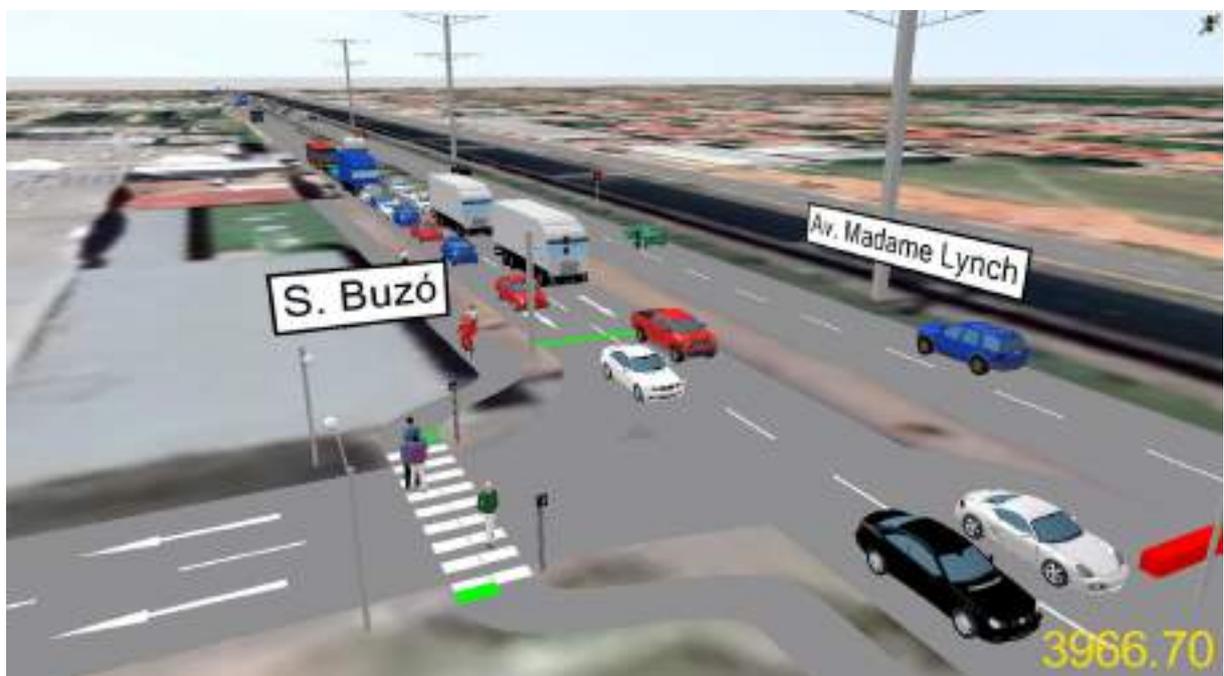


Figura 126: Comportamiento de la propuesta en Av. Madame Lynch y S. Buzó (6).

Fuente: Autor

5.5.4 Resultado de Medidas de Desempeño de la Propuesta

Resultados de **VEHICLE PERFORMANCE NETWORK**

Número de Simulación	Atraso (Promedio) (s)	Paradas (Promedio)	Velocidad (Promedio) (km/h)	Tiempo Parado (Promedio) (s)	Tiempo Total de Viaje (Average) (s)	Atraso Total (s)	Paradas Totales	Total de Tiempo Parado (s)	Vehículos Ingresados	Vehículos en Espera
Simulation Run	Delay (Average) (s)	Stops (Average)	Speed (Average) (km/h)	Delay Stopped (Average) (s)	Total Travel Time (Average) (s)	Delay Total (s)	Total Stops	Total Delay Stopped (s)	Vehicles Arrived	Vehicles on demand
1	80	1.38	27.8	61.1	893378	370791	6389	283124	4380	0
2	83	1.36	27.4	64.9	888202	375670	6107	292186	4302	3
3	116	2.02	23.2	90.2	1067897	544546	9450	422891	4405	0
4	105	1.73	24.8	82.5	1004836	483775	7944	378771	4389	0
5	88	1.45	26.7	69.5	923263	402479	6657	318156	4331	0
PROMEDIO	95	1.59	26.0	73.6	955515	435452	7309	339025	4361	0.6
DESVIACIÓN EST.	16	0.28	1.9	12.3	78253	75958	1388	59933	43	1.34
MÍNIMOS	80	1.36	23.2	61.1	888202	370791	6107	283124	4302	0
MÁXIMOS	116	2.02	27.8	90.2	1067897	544546	9450	422891	4405	3

Tabla 17: Resultados de Vehicle Performance Network para el Modelo Propuesta.

Fuente: Autor

Resultados de **QUEUE COUNTERS**

Vía de Conteo	Intervalo de Análisis	Distancia de Cola Promedio (m)	Distancia de Cola Máxima (m)	Número de Paradas
Link	Time Interval	Average Queue Counter (m)	Max. Queue Counter (m)	Queue Stops
M. Lynch N-S	1200-4800	31	178	364
M. Lynch S-N	1200-4800	138	347	1880
A. Silva E-O	1200-4800	58	148	929
A. Silva O-E	1200-4800	64	163	382
Giro a S. Buzó	1200-4800	49	153	436

Tabla 18: Resultados de Queue Counters para el Modelo Propuesta.

Fuente: Autor

Resultados de **VEHICLE TRAVEL TIMES**

Vía de Conteo	Intervalo de Análisis (S)	Vehículos Contabilizados	Tiempo Promedio de Viaje (s)	Distancia Recorrida (m)
Link	Time Interval (s)	Vehicles Recorded	Average Travel Time (s)	Distance Traveled (m)
M. Lynch N-S	1200-4800	920	152	1000
M. Lynch S-N	1200-4800	1563	117	1000
A. Silva E-O	1200-4800	711	130	556
A. Silva O-E	1200-4800	309	159	512

Tabla 19: Resultados de Vehicle Travel Times para el Modelo Propuesta.

Fuente: Autor

Resultados de NODES

<i>Vía de Origen</i>	<i>Movimiento / Destino</i>	<i>Atraso Promedio (s)</i>	<i>Nivel de Servicio</i>	<i>Valor de Nivel de Servicio</i>
		<i>Average Delay (s)</i>	<i>LOS</i>	<i>LOS Value</i>
M. Lynch N-S	Recto a M. Lynch N-S	68	E	5
	Izquierda a S. Buzó	143	F	6
	Derecha a A. Silva O-E	63	E	5
M. Lynch S-N	Recto a M. Lynch S-N	54	D	4
	Izquierda a A. Silva O-E vía S. Bogado	103	F	6
	Derecha a S. Buzó	30	C	3
A. Silva E-O	Izquierda a M. Lynch N-S	73	E	5
	Derecha a M. Lynch S-N	98	F	6
	Recto a A. Silva O-E	67	E	5
A. Silva O-E	Izquierda a M. Lynch S-N	160	F	6
	Derecha a M. Lynch N-S	167	F	6
PROMEDIO GENERAL		80	E	5

Tabla 20: Resultados Nodes para el Modelo Propuesta.

Fuente: Autor

6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se presentan comparaciones entre los resultados obtenidos por la simulación del Modelo Base y el Modelo Propuesta, para cada uno de los métodos de evaluación adoptados.

6.1 Comparación de resultados de VEHICLE NETWORK PERFORMANCE

Analizando el atraso promedio de todas las vías involucradas en el modelo, como muestra el Gráfico 1, se nota una disminución porcentual del 77.7% del modelo base al modelo propuesto.

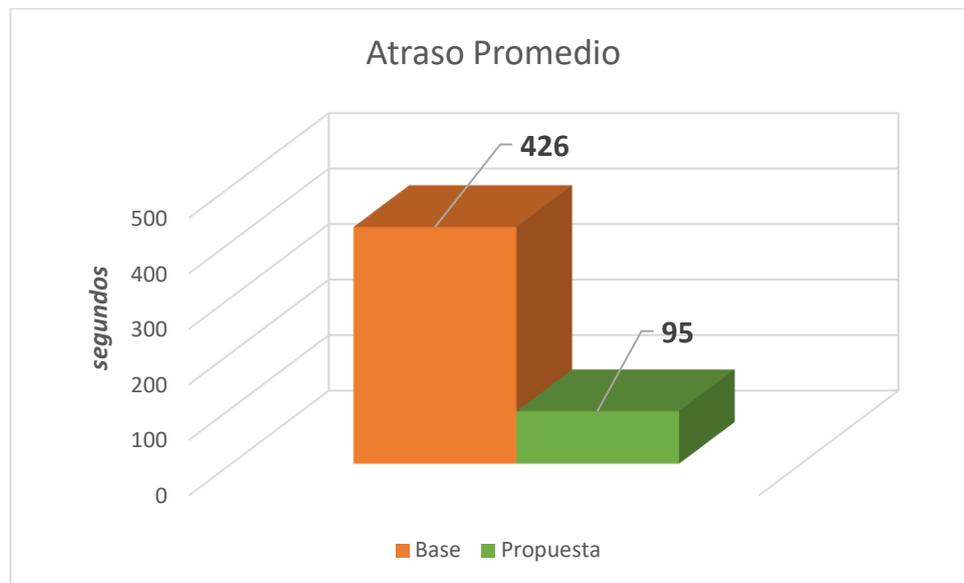


Gráfico 1: Atraso Promedio del modelo Base x Propuesta.

Fuente: Autor

Analizando los datos del Gráfico 2, se observa un aumento porcentual de la velocidad promedio de viaje en 170%, o sea 2.7 veces más rapidez en el flujo vehicular adoptando el modelo propuesto.

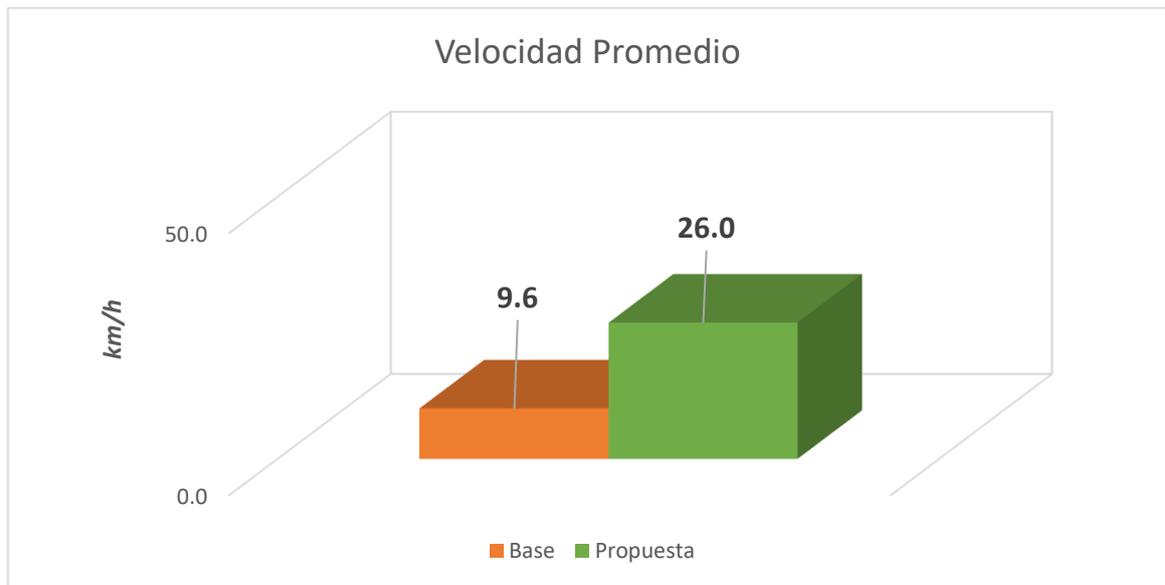


Gráfico 2: Velocidad Promedio del modelo Base x Propuesta.

Fuente: Autor

En términos de las paradas vehiculares ($V=0\text{km/h}$), según el Gráfico 3, se observa que una disminución del 88,8%.

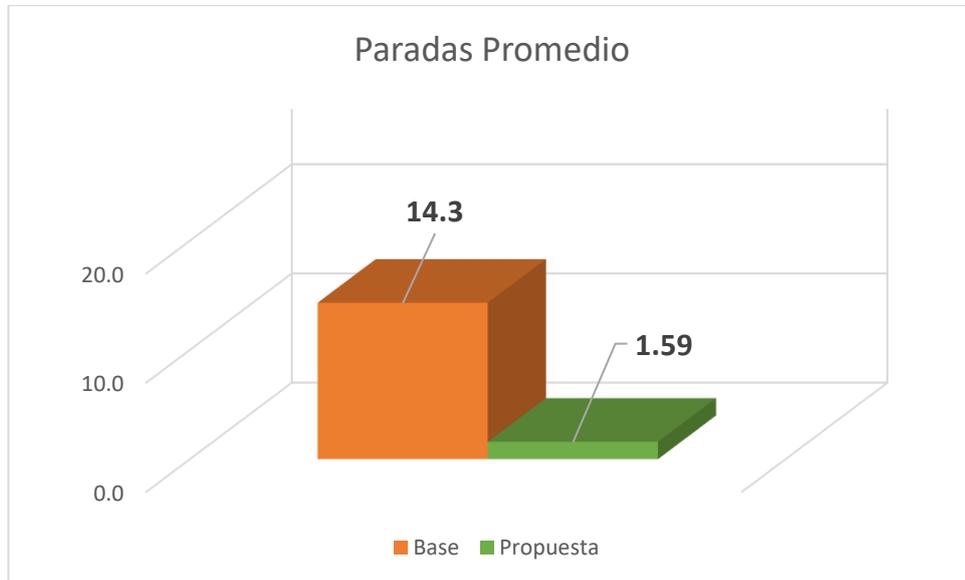


Gráfico 3: Paradas Promedio del modelo Base x Propuesta.

Fuente: Autor

Consecuencia de la reducción del número de paradas es la reducción del tiempo total parado de los vehículos que transitan por la red. Como muestra el Gráfico 4, adoptando el modelo propuesto se evidencia una disminución porcentual del 77,1% en el tiempo total parado.

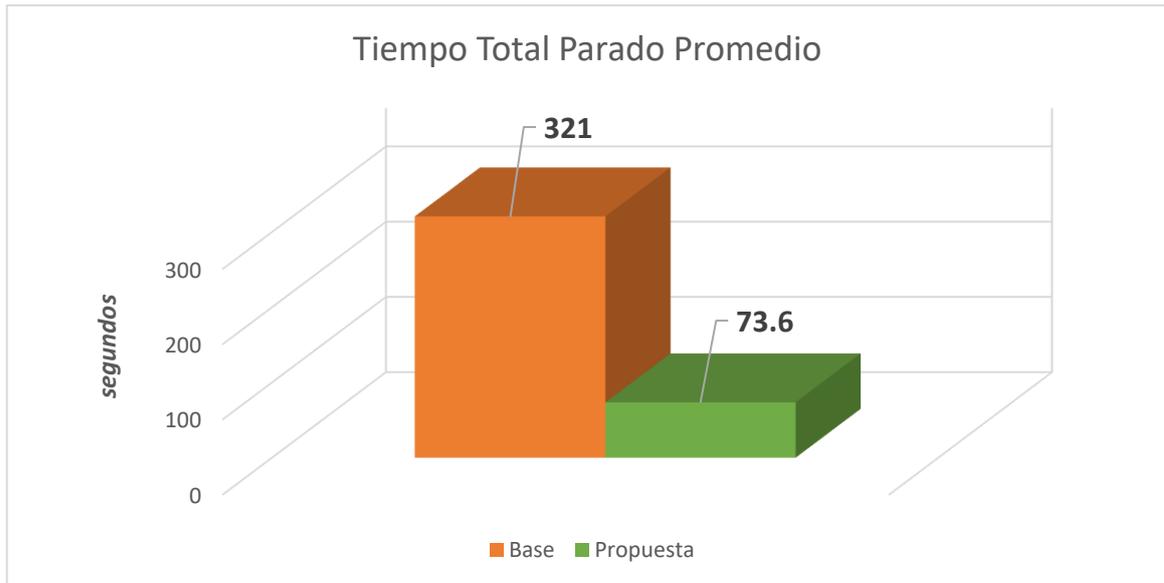


Gráfico 4: *Tiempo Total Parado Promedio del modelo Base x Propuesta.*

Fuente: Autor

Otra forma de visualizar la reducción de los tiempos perdidos en el tráfico adoptando el modelo propuesto es por medio del Gráfico 5, que ilustra una disminución del 76% en el total de horas perdidas por todos los vehículos a por causa de atrasos.

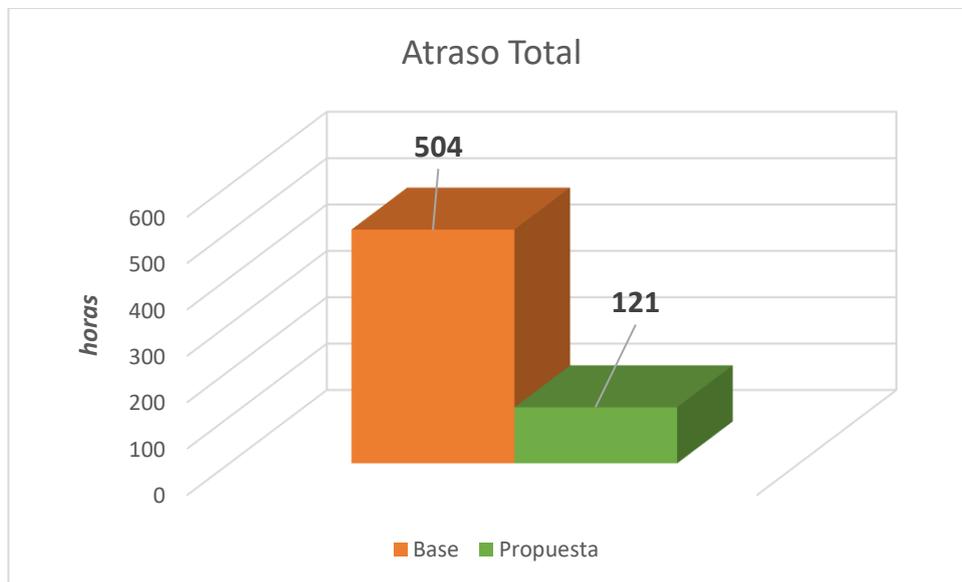


Gráfico 5: *Atraso Total del modelo Base x Propuesta.*

Fuente: Autor

6.2 Comparación de resultados de QUEUE COUNTER

Según se observa en los Gráficos 6 y 7, es evidente una reducción considerable de las distancias de cola en el modelo propuesto, en comparación al modelo base.

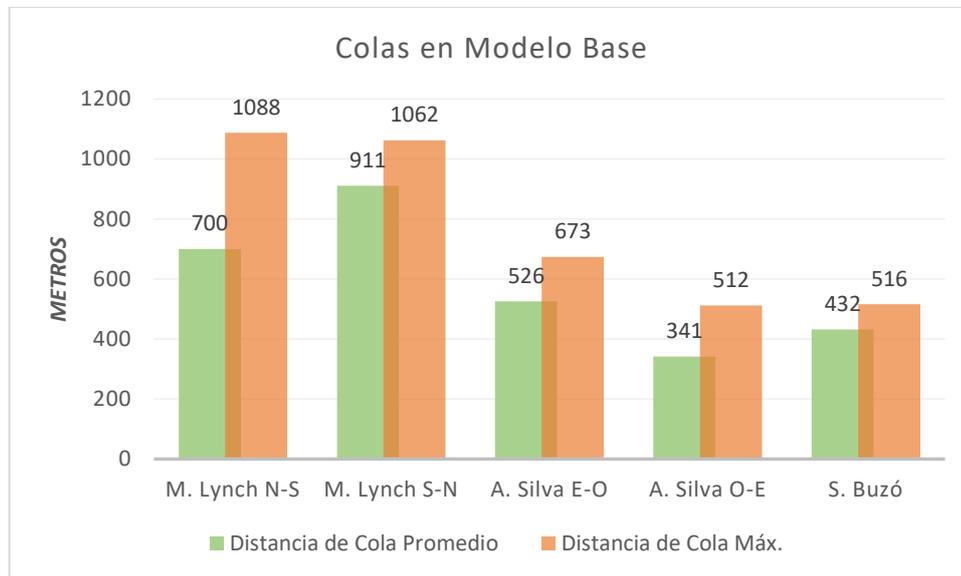


Gráfico 6: Colas del modelo base.

Fuente: Autor

En términos de disminución porcentual de distancia de cola promedio, para la Av. M. Lynch N-S se registró un valor de 95.6%, para Av. M. Lynch S-N un 84.9%, para A. Silva E-O un 89%, para A. Silva O-E un 79.6%.

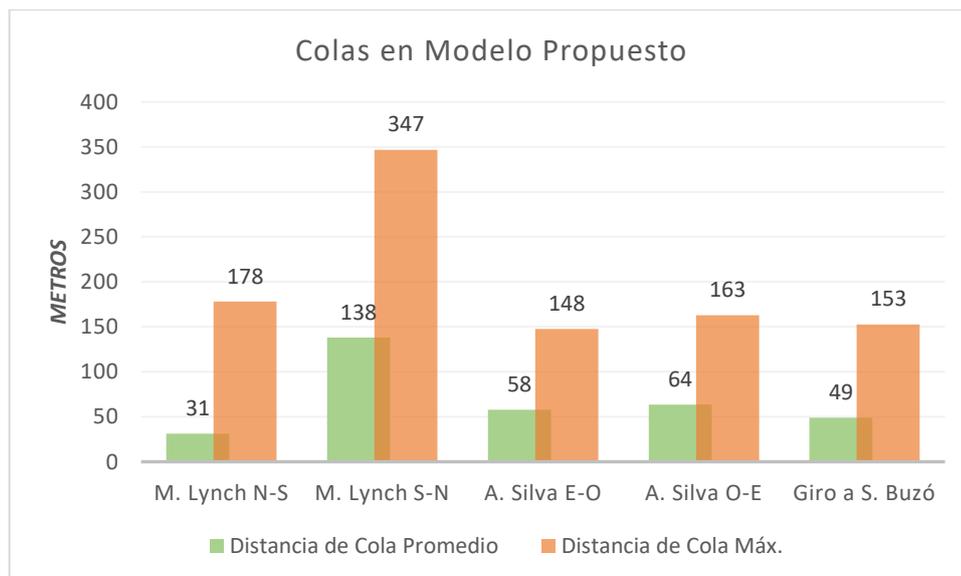


Gráfico 7: Colas del modelo propuesto.

Fuente: Autor

6.3 Comparación de resultados de VEHICLE TRAVEL TIMES

El Gráfico 8 ilustra una considerable disminución en los tiempos de viaje, principalmente en la Av. M. Lynch N-S y Av. M. Lynch S-N, con una variación porcentual negativa del 85.8%, y 91.4%, respectivamente.

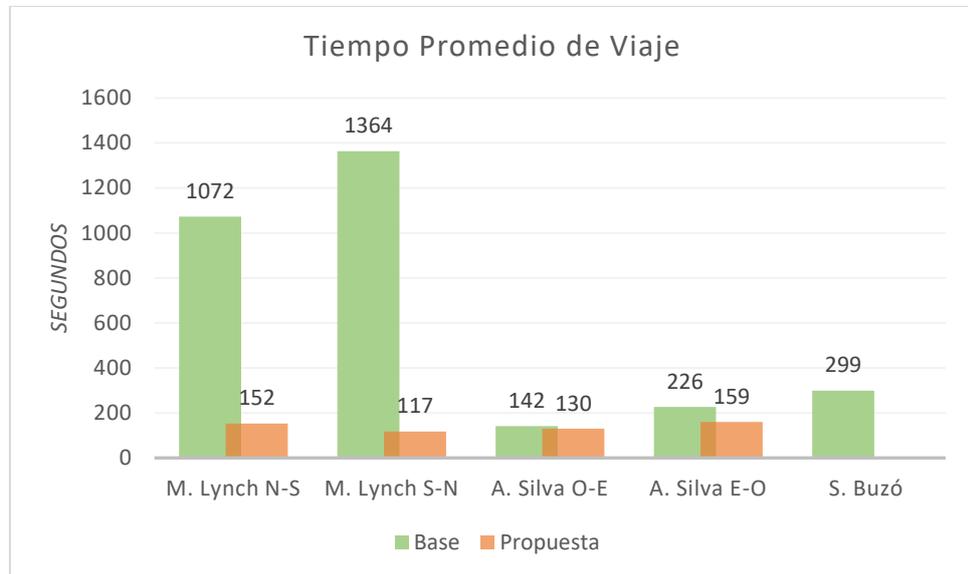


Gráfico 8: Tiempo de Viaje Promedio del modelo Base x Propuesta.

Fuente: Autor

6.4 Comparación de Resultados de NODES

Los gráficos de esta sección evidencian, en términos más claros, usando minutos, la reducción de tiempos de atraso para cada uno de los movimientos posibles en todas las vías involucradas en la intersección.

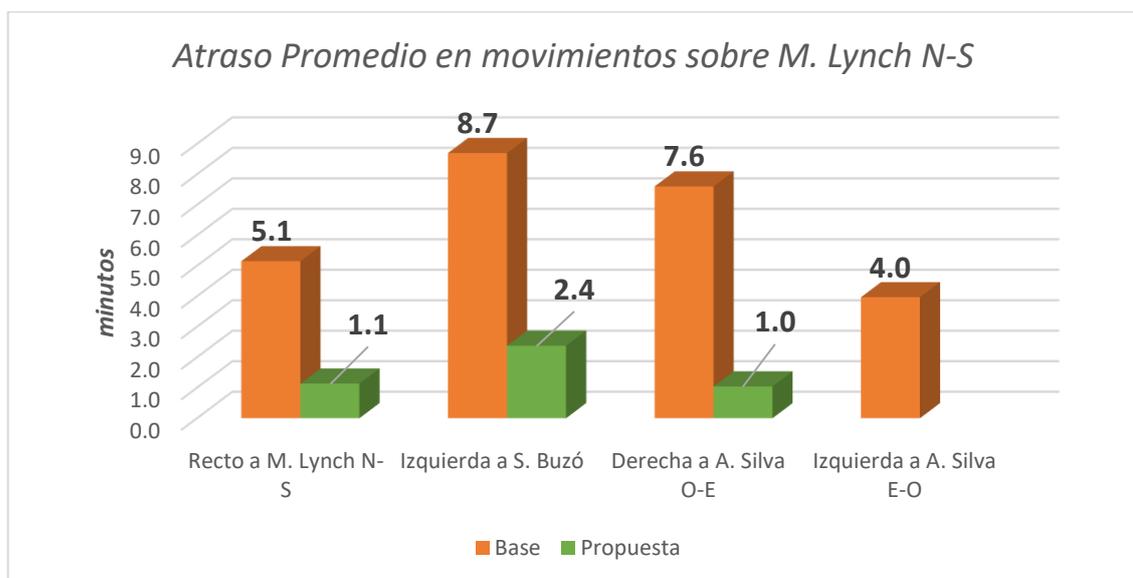


Gráfico 9: Atraso Promedio en Av. M. Lynch N-S del modelo Base x Propuesta.

Fuente: Autor

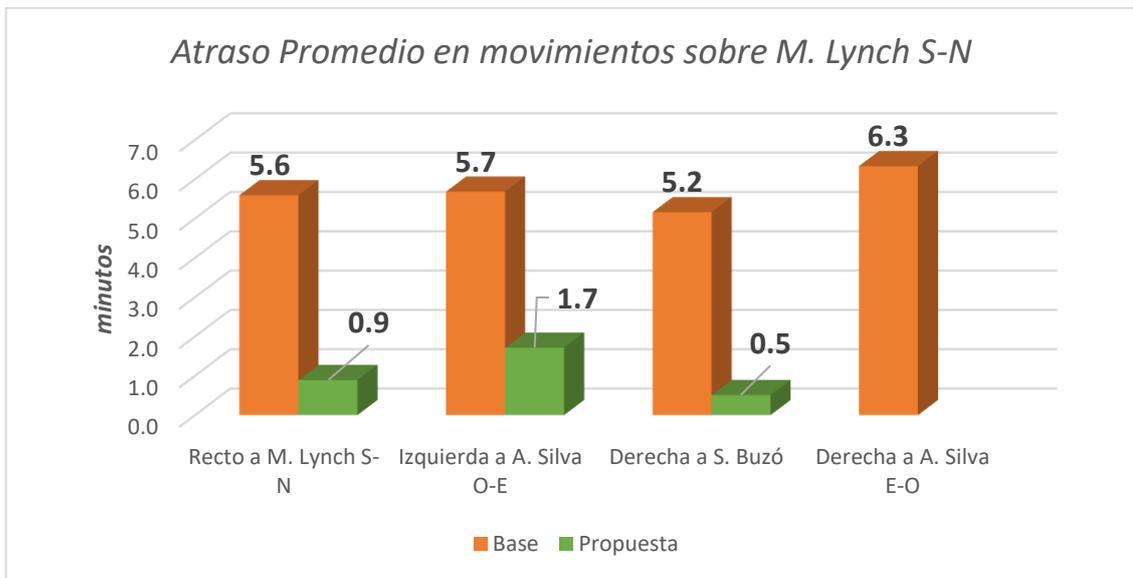


Gráfico 10: Atrazo Promedio en Av. M. Lynch S-N del modelo Base x Propuesta.

Fuente: Autor

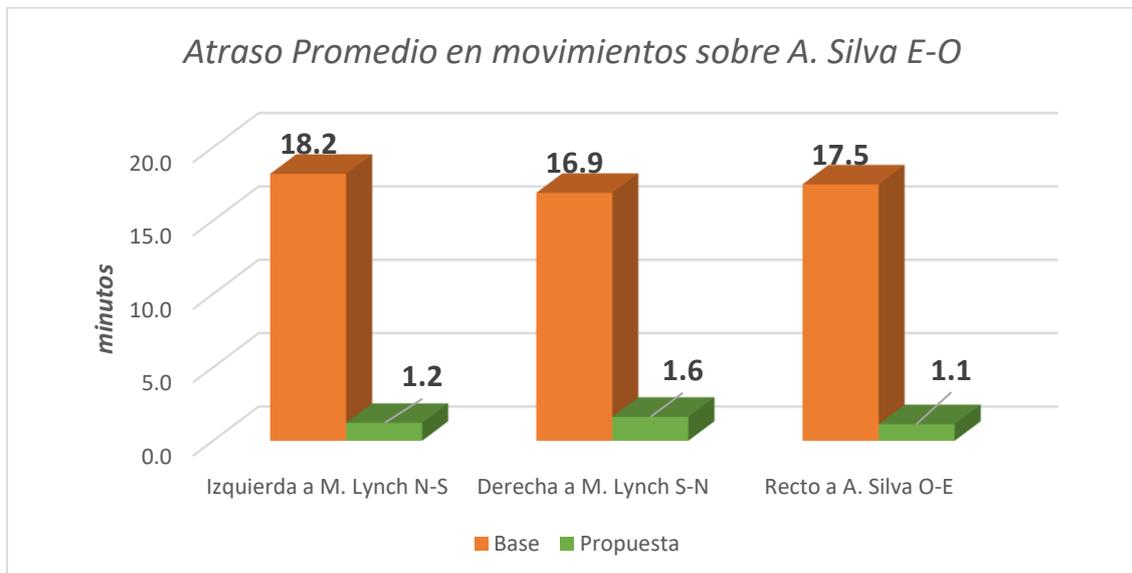


Gráfico 11: Atrazo Promedio en Alejo Silva E-O del modelo Base x Propuesta.

Fuente: Autor

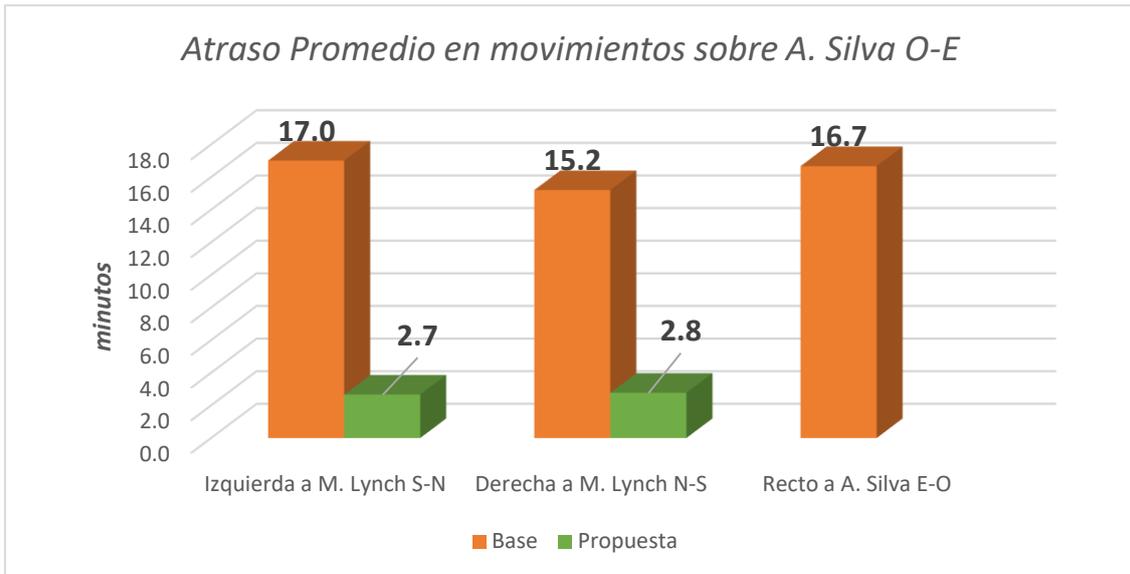


Gráfico 12: *Atraso Promedio en A. Silva O-E del modelo Base x Propuesta.*

Fuente: Autor

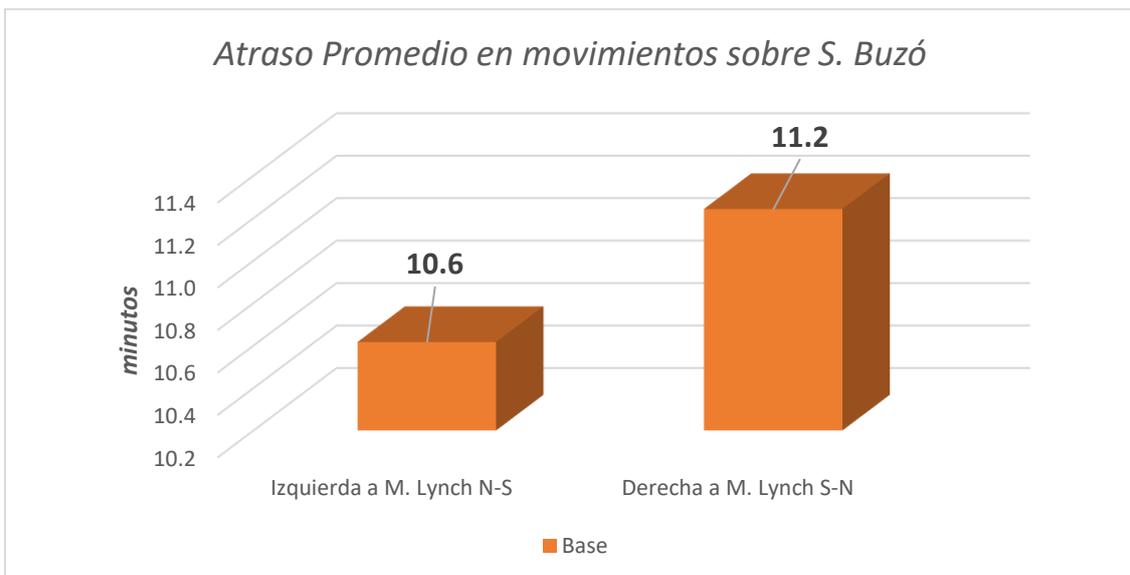


Gráfico 13: *Atraso Promedio en S. Buzó del modelo Base.*

Fuente: Autor

7 CONCLUSIÓN Y REFLEXIONES

Mediante la elaboración de este proyecto fue posible evidenciar y cuantificar el crítico estado de tráfico del área de estudio, compuesta por el par de intersecciones de la Av. Madame Lynch con Alejo Silva, y de la Av. Madame Lynch con Sinfiorano Buzó.

Con el respaldo de datos de campo, imágenes satelitales, tomas videográficas con dron, y resultados de la simulación computacional del modelo base, fue posible proponer técnicamente un sistema vial que permite reducir sustancialmente los tiempos de atraso de viajes y distancias de cola vehicular, como también garantiza la seguridad vial del tránsito multimodal; incluyendo peatones, ciclistas, y ómnibus.

Este proceso fue logrado exitosamente mediante la exhaustiva investigación y capacitación en materia de manipulación del software **PTV Vissim** con una licencia de investigación otorgada por PTV Group. En adición, fue fundamental la realización del conteo vehicular en horario pico, y el detallado análisis del comportamiento de conducción de los usuarios de las vías involucradas.

El modelado en el software del escenario base presentó varios desafíos, incluyendo la dificultad de modelar el complejo e inconsistente comportamiento vehicular en el área de estudio, debido a la sobrecarga de esta y a estilos de conducción locales. Inicialmente se evidenció la total saturación de la red, y la imposibilidad de replicar, en un intervalo de tiempo determinado, el flujo vehicular real. A pesar de eso, recurriendo a una calibración minuciosa donde las reglas de prioridad de paso, parámetros de *driving behavior* como los de *car-following model* y *lane change*, y velocidades de flujo asumieron un rol fundamental, se pudo validar de manera aceptable el modelo, utilizando el índice *GEH Statistics*.

La concepción de la propuesta de intervención nace de la observación y estudio de intersecciones con problemáticas similares tanto a nivel local como internacional. Evidencias claras respaldan el impacto positivo de la adopción de binarios viales para el descongestionamiento urbano, como también la sólida posición de ingenieros de tráfico con relación a la eliminación de giros a la izquierda, y la necesidad de semaforización, que se presenta como el método de control de tráfico más eficiente para escenarios saturados.

Los resultados de las medidas de desempeño adoptadas para evaluar y contrastar el escenario base con el escenario propuesto ofrecieron resultados notablemente alentadores para el descongestionamiento vial, con reducciones de distancia de cola entre el 79% y 95%, y reducción en tiempos de viaje entre 85% y 91%. Esto, sumado a la observación del proceso de simulación en 3D, permite identificar una mejora considerable en el desempeño de la intersección.

Se concluye, finalmente, que la propuesta de intervención realizada es claramente efectiva para mejorar el nivel de servicio de la intersección, puntualmente en el horario pico de la tarde. Se sugiere explorar la posibilidad de recolección de datos de tráfico para horarios no pico, como así también el horario pico de la mañana, seguidamente evaluar el comportamiento de la intersección. Aun así, suponiendo variaciones no muy elevadas de flujo vehicular a lo largo del día, se asume que el modelo presentado, a pesar de servirse de semáforos de tiempo fijo, garantizaría un mejor desempeño y seguridad vial en comparación a al escenario base.

De cualquier manera, en base a experiencias de gestión de tráfico en diversas metrópolis, se anticipa que la forma más eficiente de controlar intersecciones es por medio de semáforos de tiempos adaptativos, o inteligentes, que adecuan los tiempos de ciclo y fases a las demandas de tráfico en tiempo real.

Para la realización de este proyecto fueron consultadas diversas fuentes bibliográficas brasileras, americanas y también europeas, todas con prestigio y reconocimiento dentro de la comunidad académica, las cuales referencian y conjugan conceptos de simulación computacional e ingeniería de tránsito. Mediante la estandarización de procedimientos, el proceso de masterización de la metodología de *modelado, análisis, y evaluación* de intersecciones viales para la gestión de tráfico fue potenciado positivamente, y permitió explorar innumerables alternativas para el descongestionamiento de la intersección en estudio con asertividad y precisión.

Se concluye, finalmente, que la simulación computacional de tráfico por medio del software **PTV Vissim** ofrece amplias ventajas, oportunidades y potencialidades para la gestión de tráfico principalmente en entornos urbanos; la misma agiliza el proceso de detección de conflictos viales, y la proposición de soluciones eficaces ante las mismas.

8 ANEXOS

8.1 Órganos Brasileños De Tránsito

Para entender las diversas instituciones involucradas en la gestión del tráfico a nivel nacional en Brasil, es necesario saber qué es el **Sistema Nacional de Tránsito** es un conjunto de órganos y entidades del país, estados, Distrito Federal y municipios.

El mismo está integrado por los siguientes órganos:

Normativos y consultivos

CONTRAN (Consejo Nacional de Tránsito)

CETTRAN (Consejos Estatales de Tráfico)

CONTRANDIFE (Consejo de Tránsito del Distrito Federal)

Ejecutivos de Tránsito

DENATRAN (Dirección Nacional de Tránsito)

DETRAN (Departamentos Estatales de Tránsito)

Ejecutivos de Carreteras

DNIT (Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte)

DER (Departamentos de Caminos y Carreteras)

Policía y otros

PRF (Policía Federal de Caminos)

Policía militar

JARI (Juntas Administrativas de Apelaciones de Infracciones).

La **DENATRAN** es el organismo nacional que controla, supervisa e inspecciona todas las políticas de tránsito en Brasil. También es responsable de las acciones de educación y concienciación vial.

El rol principal de **DENATRAN** es supervisar y velar por el cumplimiento de la legislación de tránsito, además de ejecutar también los lineamientos establecidos por **CONTRAN**.

DETRAN, por su parte, actúa como la unidad estatal que representa a **DENATRAN**, estando presente en prácticamente todas las ciudades del país. **DETRAN** es responsable de la formación y calificación de nuevos conductores, renovación de CNH, registros de vehículos (CRV y CRLV) y documentación obligatoria para vehículos extranjeros.

El Consejo Nacional de Tránsito (**CONTRAN**) es responsable de coordinar los órganos del Sistema Nacional de Tránsito, velando por que exista integración entre sus actividades y la regulación del Código Brasileño de Tránsito (**CTB**).

El Departamento Nacional de Infraestructura de Tránsito (**DNIT**) es el organismo responsable de la construcción, mantenimiento e inspección de las vías navegables, vías

férreas y carreteras federales. Cualquier construcción a nivel federal, ya sea vial, férrea o fluvial, está a cargo del DNIT.

8.2 Factor de Equivalencia de UCP para diferentes tipos de vehículos

<i>Tipo de Vehículo</i>	<i>Factor de Equivalencia</i>
Automóvil	1.0
Motocicleta	0.33
Ómnibus	2.0
Camión de 2 ejes	2.0
Camión de 3 ejes	3.0

Fuente: CONTRAN (2014)

8.3 Tabla de para Validación de la Calibración del Modelo en PTV Vissim

OBJETIVOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO	
Fuente: Adaptado de la tabla 7.7 de FDOT Traffic Analysis Handbook	
ELEMENTO DE CALIBRACIÓN	OBJETIVO DE CALIBRACIÓN
Capacidad	La capacidad simulada debe estar dentro del 10% de erros con relación a las medidas de campo.
Volumen de Tráfico	<p>Los volúmenes de las vías simuladas y medidas, para que más del 85% de ellos, deben estar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dentro de 100 vph de error para volúmenes inferiores a 700vph. - Dentro del 15% de error para volúmenes entre 700 vph y 2700 vph. - Dentro de 400 vph de error, para volúmenes superiores a 2700 vph. <p>Los volúmenes de enlaces simulados y medidos, para que más del 85% de ellos, deben tener un valor estadístico GEH de cinco (5) o menos.</p> <p>La suma de los volúmenes de todos los enlaces dentro del área de calibración debe estar dentro del 5% de error.</p> <p>La suma de volúmenes de todos los enlaces debe tener un valor estadístico GEH de 5 o inferior.</p>
Tiempo de viaje	<p>El tiempo de viaje simulado debe estar dentro de ± 1 minuto de error para rutas con tiempos de viaje observados de menos de siete (7) minutos.</p> <p>El tiempo de viaje simulado debe estar dentro de $\pm 15\%$ de error para rutas con tiempos de viaje observados superiores a siete (7) minutos.</p>
Velocidad	Las velocidades promedio en las vías modeladas deben estar dentro del ± 16 km/h de error con relación a las velocidades medidas en campo en al menos el 85% de todos los enlaces de red.
Atraso	Los tiempos de atraso de vías simulados y medidos en campo deben estar dentro del 15% en más del 85% de los casos.
Longitud de Cola	La diferencia entre las longitudes de cola simuladas y observadas debe estar dentro del 20%.

8.4 Contador Manual Múltiple



Valores parciales obtenidos durante el proceso de conteo de tráfico.

Fuente: Autor

8.5 Equipo de Voluntarios de Apoyo



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIA REVISTA; ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y ARTES (2016).** Problemática del Tránsito em Asunción y Propuestas de Soluciones. Blog. Disponible en: <https://www.aia.com.py/2901-problematika-del-transito-de-asuncion-y-propuestas-de-soluciones/>. Visitado en 30/03/2023.
- Agencia Nacional de Tránsito y Seguridad Vial (ANTSV) (2020).** Informe Estadístico Anual. Dirección de Observatorio Vial, Estadísticas y Registro de Datos.
- Agencia Nacional de Tránsito y Seguridad Vial (ANTSV) (2022).** Informe De Gestión Anual. Dirección de Observatorio Vial, Estadísticas y Registro de Datos.
- Ahmed, H.U.; Huang, Y.; Lu, P. (2021).** A Review of Car-Following Models and Modeling Tools for Human and Autonomous-Ready Driving Behaviors in Micro-Simulation. Smart Cities 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/smartcities4010019>. Visitado en: 10/05/2023.
- Akgüngör, A. P. (2007).** A New Delay Parameter Depent on Variable Analysis Periods at Signalized Intersections. Part 1: Model Development. Transport, 31-36.
- Alba, M., & Hernández, O. (2013).** Comparación de dos Métodos de Diseño para ciclos de semáforos. Revista Cubana de Ingeniería. Vol, IV. La Habana, Cuba.
- Aquino, T. (2017).** Análise Da Interseção Semaforizada Formada Pelas Av. Prudente De Moraes E Av. Amintas Barros. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN.
- Archer, J. (2010).** Signal Treatments to Reduce the Likelihood of Heavy Vehicle Crashes at Intersections: Microsimulation Modeling Approach. Journal Of Transportation Engineering. Pág. 632-639.
- Archer, J. (2005).** Methods for the assessment and prediction of traffic safety at urban intersection and their application in microsimulation modelling. Doctoral Thesis, Department of Infrastructure. Royal Institute of Technology, Sweden.
- Balich, Borhan E. (2019).** Wiedemann's Car-Following Model. LinkedIn Article. 09/12/2019. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/wiedemann-car-following-model-borhan-eddin-balich-mem-eit/>. Visitado en: 07/05/2023
- Banco Mundial (2020).** Superficie en Kilómetros Cuadrados de Paraguay. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.SRF.TOTL.K2?locations=PY>. Visitado en: 24/03/2023
- Banco Mundial (2021).** Población Urbana del Paraguay. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/Sp.urb.totl.in.ZS?locations=PY>. Visitado en: 24/03/2023

- Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2013).** Comparative case studies: IDB-supported urban transport projects. Office of Evaluation and Oversight Approach Paper. IDB, Washington, DC. Disponible en: <https://publications.iadb.org/en/approach-paper-comparative-case-studies-idb-supported-urban-transport-projects>. Visitado en 04/04/2023.
- Banco Interamericano de Desarrollo (2020).**
Hacia programas de seguridad vial basados en evidencia en Paraguay. Moviliblog. Blog. Disponible en: https://blogs.iadb.org/transporte/es/hacia-programas-de-seguridad-vial-basados-en-evidencia-en-paraguay/#_ftn5. Visitado en: 29/03/2023.
- Banco Interamericano de Desarrollo (2018).** Sistemas de Transporte Urbano en América Latina y el Caribe: Lecciones y Retos. BID Invest. Disponible en: <https://www.idbinvest.org/en/download/8735>. Visitado en 04/04/2023.
- Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) (2011).** Desarrollo urbano y movilidad en América Latina. Dirección de Análisis y Programación.
- Buckholz, J. W (2010).** Introduction to Traffic Signals; Introduction to Traffic Signal Phasing. PDH Engineer Continuing Education Course.
- Campo Grande News (2020).** Alunos já podem agendar exames práticos de habilitação, diz Detran. Disponible en: <https://www.campograndenews.com.br/cidades/capital/alunos-ja-podem-agendar-exames-praticos-de-habilitacao-diz-detran>. Visitado en: 19/04/2023.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2022).** América Latina y el Caribe es una de las regiones más impactadas demográficamente por la crisis sanitaria. Observatorio Demográfico. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/noticias/america-latina-caribe-es-regiones-mas-impactadas-demograficamente-la-crisis-sanitaria#:~:text=La%20publicaci%C3%B3n%20se%20B1ala%20que%20la,3%25%20de%20la%20poblaci%C3%B3n%20mundial>. Visitado en: 04/04/2023.
- Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) (2014).** Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito. Volume 5. Sinalização Semafórica.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2013).** Manual para el Diseño y la Construcción de Indicadores. Instrumentos principales para el monitoreo de programas Sociales de México. México, DF.
- Cunto, F.; Loureiro, C. (2011).** O uso da microssimulação na avaliação do desempenho da segurança viária. Revista Transportes, Rio de Janeiro, v. 19, ed. 3. Disponible en: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/527/pdf>. Visitado en: 11/04/2023.
- Cunha, A. & Setti, J. (2006).** Calibração do modelo de desempenho de caminhões do CORSIM através de um algoritmo genético. Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, Vol. 1.

- Dirección del Registro de Automotores (DRE) (2023).** Corte Suprema de Justicia. Departamento de Informática: División de Procesamiento de Datos y Soporte a Usuarios. Informes Estadísticos Anuales del 2010 al 2023. Disponible en: <https://www.pj.gov.py/contenido/155-direccion-del-registro-de-automotores/1331>. Visitado en: 29/03/2023.
- Departamento Nacional de Infra-Estructura de Transportes (DNIT) (2006).** Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de estudos de tráfego. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Infra-Estructura de Transportes (DNIT) (2005).** Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de projeto de interseções. 2.ed. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) (2008).** Código Brasileiro de Trânsito. 3ed. Brasília. Disponible en: <https://www.detran.am.gov.br/wp-content/uploads/2015/04/ctb.pdf>. Visitado en 19/04/2023.
- Depiante, V. (2011).** Capacidad en Intersecciones No Semaforizadas de Tres Ramas. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
- Ding, Z. J. (2010).** Traffic Flow at a Signal Controlled T-Shaped Intersection.
- García, E.; Bencomo, J.; Esparza, A. (2015).** Análisis y Evaluación de Intersecciones Urbanas. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
- Green J, Sánchez S. (2013).** La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica.
- Hauer, E. (2002).** Observational Before-after Studies in Road Safety, 1ed. Pergamon.
- Hellinga, B. (2008).** Signalized Intersection Analysis and Design: Implications of Day-to-Day Variability in Peak-Hour Volumes on Delay. Journal of Transportation Engineering, Pág. 307-318.
- Hoel, Lester A.; Garber, Nicholas J.; Sadek, Adel W.; (2011).** Engenharia de Infraestrutura de Transportes: Uma integração multimodal. São Paulo: Cengage Learning.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2015)** Proyección de la Población por Sexo y Edad, según Distrito, 2000-2025. Revisión 2015. Páginas 17-36. Disponible en: https://www.ine.gov.py/Publicaciones/Biblioteca/documento/7132_Proyeccion%20Distrital.pdf. Visitado en: 24/03/2023.
- Instituto Nacional de Estadística (INE) (2019).** Evolución del Parque Automotor Registrado por Año, según clase de vehículo. Periodo 2010-2019. Disponible en: https://www.ine.gov.py/assets/documento/191772.5.1_CEA2019.xlsx. Visitado en: 24/03/2023.
- Instituto Nacional de Estadística (INE) (2023).** Proyecciones de población nacional, áreas urbana y rural, por sexo y edad. Páginas 1-2. Disponible en:

https://www.ine.gov.py/Publicaciones/Biblioteca/documento/211/000_Paraguay_2023.pdf.

Visitado en: 24/03/2023.

- Korea International Cooperation Agency (KOICA) (2023).** Proyecto de Mejoramiento de Transporte Público para la Mitigación de la Congestión del Tráfico en Asunción y Gran Asunción, Paraguay.
- La Nación (2016).** Al menos 600mil vehículos ingresan diariamente a Asunción. Reporte Periodístico. Disponible en: <https://www.lanacion.com.py/2016/05/27/al-menos-600-mil-vehiculos-ingresan-diariamente-asuncion/#:~:text=Cerca%20de%201.320.000%20personas,los%20municipios%20del%20%C3%81rea%20Metropolitana>. Visitado en: 29/03/2023.
- Lu, J. J. (2013).** A Programmable Calculation Procedure for Number of Traffic Conflict Points at Highway Intersections. *Journal of Advanced Transportation*, (Pág. 692-703)
- Mannering, Fred L.; Washburn, Scott S. (2020).** Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis. University of South Florida. University of Florida. 7th edition.
- Martín, L. E. et al. (2019).** Atraso de pedestres em travessias semaforizadas: uma comparação entre as modelagens pelo HCM e pelo microssimulador VISSIM. *Revista Transportes*, Rio De Janeiro, RJ.
- Maia, F. & Loureiro, C. (2008).** Procedimento Sistemático para Simulação do Tráfego Veicular em Modelos Mesoscópicos e Microscópicos. Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Fortaleza.
- Mathew, T. V. (2019).** Capacity and Level of Service. *Lecture Notes in Transportation Systems Engineering*. Indian Institutes of Technology. National Programme on Technology Enhanced Learning.
- Mathew, T. V. & Krishna, R. (2007).** Introduction to Transportation Engineering. Chapter 35: Capacity and Level Of Service. Indian Institutes of Technology. National Programme on Technology Enhanced Learning.
- Naciones Unidas – Habitat. (UN-Habitat) (2012).** The state of Latin American and Caribbean cities 2012: Towards a new urban transition. United Nations Human Settlements Programme, Nairobi.
- Noronha, H. B. (2016).** Estudo comparativo de dois microssimuladores de tráfego – AIMSUN e VISSIM. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/164574>. Visitado en: 22/04/2023.

- Papazian, A. (2008).** Infraestructura del transporte terrestre Diseño Geométrico. Buenos Aires. Disponible en: <https://www.slideserve.com/salena/infraestructura-del-transporte-terrestre-dise>. Visitado en 19/04/2023.
- PNUD, FMAM, STP, MADES (2021).** Atlas del Área Metropolitana de Asunción. Proyecto “Asunción Ciudad Verde de las Américas – Vías a la Sustentabilidad”. Asunción, Paraguay. Disponible en: <https://ciudadessustentables.stp.gov.py/wp-content/uploads/2021/12/libro-atlas-metropolitano-web-09-11-2021-compressed-compressed-compressed.pdf>. Visitado en: 30/03/2023.
- Pazos, E. (2016).** The importance of public transport in Latin America. Intelligent Transport. Disponible en: <https://www.intelligenttransport.com/transportarticles/19098/importance-public-transport-latin-america/>. Visitado en: 04/04/2023.
- PTV America & Missouri Department of Transportation (MDOT) (2022).** PTV Vissim Model Review Training. Disponible en: <https://company.ptvgroup.com/en-us/vissim-review>. Visitado en 01/05/2023.
- PTV America Knowledge Base (2021).** Getting to Know PTV Vissim – Episode 7: Calibration / Driving Behavior. 19/04/2021. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=iZN_o0N8HfA&ab_channel=PTVAmericaKnowledgeBase. Visitado en: 01/05/2023
- PTV Group (2023a).** Traffic Simulation. Página Web. Disponible en: <https://www.myptv.com/en/application-areas/traffic-simulation#typesoftrafficsimulation>. Visitado en: 22/04/2023.
- PTV Group (2023b).** PTV Vissim 2023 User Manual. PTV Planung Transport Verkehr GmbH, Karlsruhe, Germany.
- PTV Group (2018).** ¿Cómo calcular el indicador de Calibración GEH dentro de PTV Vissim? Video Tutorial presentado por Alejandro Saniger. Gerente Técnico de PTV América Latina.
- Ribeiro, R. L. et al. (2017).** O uso da microssimulação de tráfego na segurança viária: uma revisão sistemática da literatura. Congresso Nacional De Pesquisa Em Transporte Da ANPET, XXXI. Recife.
- Seiler, C. (2008).** Republic of drivers: a cultural history of automobility in America. Chicago, Estados Unidos. University of Chicago Press.
- Secretaría de Movilidad de Medellín.** Manual de Señalizaciones. Capítulo 7: Semáforos. Alcaldía de Medellín. Medellín, Colombia. Disponible en: https://www.medellin.gov.co/movilidad/documents/seccion_senalizacion/cap7_semaforos.pdf. Visitado en 25/04/2023
- Singh, D. (2009).** Stochastic optimization method for signalized traffic signal systems. International Journal of Knowledge Based Intelligent Engineering Systems, Pág. 71-77.
- Transport for London (2021).** Traffic Modelling Guidelines. Version 4.0.

- The Columbia River Crossing (2006).** Vissim Calibration and Validation: Technical Disponible en: https://www.wsdot.wa.gov/accountability/SSB5806/docs/3_Context_Constraints/TrafficData/00156_2006_08_28.pdf. Visitado en: 10/05/2023.
- United Nations Road Safety Fond (UNRSF) (2021).** Fomento De La Seguridad Vial y la Movilidad Sostenible En Paraguay. Blog. Disponible en: <https://roadsafetyfund.un.org/es/projects/fomento-de-la-seguridad-vial-y-la-movilidad-sostenible-en-paraguay>. Visitado en: 29/03/2023.
- Última Hora (2017).** "Pará un poco", una campaña para respetar señales de tránsito. Disponible en: <https://www.ultimahora.com/para-un-poco-una-campana-respetar-senales-transito-n1112548.html>. Visitado en: 19/04/2023.
- Vidal Roca. (2010).** Aplicación de Modelos de Microsimulación en la Ingeniería de Tránsito. Obtenido de Revista Vial: <http://revistavial.com/aplicacion-de-modelos-de-microsimulacion-en-laingenieria-del-transito-25993/>
- Virginia Department of Transportation.** Level of Service Definitions. Disponible en: <https://www.virginiadot.org/projects/resources/los-defined.pdf>. Visitado en: 23/04/2023
- Wang, Y. G. (2011).** Integrating before and after crash features into measuring the effectiveness of intersection safety improvement project in Harbin. Transport, Pág. 111-120.
- Wiedemann, R. & Reiter, U. (1992).** Microscopic traffic simulation: the simulation system MISSION, background and actual state. Vol. 2. Bruselas; Bélgica.
- Wisconsin Department of Transportation (WisDOT) (2021).** Vissim Calibration Parameters. Disponible en: <https://wisconsin.gov/dtsdManuals/traffic-ops/manuals-and-standards/teops/16-20att6.3.pdf>. Visitado en: 10/05/2023.

