

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LA RED SEMAFÓRICA DE INTERSECCIONES DEL
ANILLO VIAL DE VILLAVICENCIO: UN ENFOQUE CON CAPACIDAD VIAL, FLUJOS
VEHICULARES Y SINIESTRALIDAD



ANDRES FELIPE GONZALEZ DUEÑAS



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LA RED SEMAFÓRICA DE INTERSECCIONES DEL
ANILLO VIAL DE VILLAVICENCIO: UN ENFOQUE CON CAPACIDAD VIAL, FLUJOS
VEHICULARES Y SINIESTRALIDAD

ANDRES FELIPE GONZALEZ DUEÑAS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Mg. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ

Magíster en Infraestructura vial

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGUO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Seccional Villavicencio

Mg. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

A mis padres, por su inquebrantable amor y sacrificio, y a mis maestros, por su incansable guía y sabiduría. A mis compañeros y amigos, por su apoyo constante. A todos, mi más profundo agradecimiento.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Santo Tomás, especialmente a nuestros asesores, el Ing. Luis Fernando Díaz y la Ing. Julieth, por su invaluable orientación y apoyo durante todo el desarrollo de este proyecto. Agradezco profundamente a mis padres por su inquebrantable apoyo y sacrificio. También extendo mi gratitud a las autoridades locales de Villavicencio por proporcionarnos los datos necesarios para nuestro estudio.

Contenido

	Pág.
Lista de tablas	9
Lista de figuras	10
Resumen	11
Abstract.....	12
Glosario.....	13
Introducción.....	14
1. Objetivos	16
1.1. Objetivo general.....	16
1.2. Objetivos específicos	16
1.2.1 Valorar el estado actual del sistema de semáforos en las intersecciones y cruces a lo largo del Anillo Vial de Villavicencio respecto a su Tráfico Promedio Diario (TPD) actual.	16
1.2.2 Cuantificar los flujos vehiculares diarios en el Anillo Vial para comprender la demanda y comportamiento de tráfico vehicular.	16
1.2.3 Analizar la siniestralidad en el Anillo Vial, identificando patrones de accidentes y proponiendo medidas de mitigación.....	16
1.2.4 Diseñar un plan de semaforización eficiente y seguro que optimice el flujo vehicular y reduzca la siniestralidad en el Anillo Vial.....	16
2. Metodología.....	17
2.1. Valoración del estado actual del sistema de semáforos	17
2.1.1 Análisis de la capacidad vial actual:	17
2.1.2 Evaluación de la sincronización semafórica:	18
2.1.3 Identificación de puntos críticos:	18
2.2. Cuantificación de flujos vehiculares diarios	18
2.2.1 Recolección de datos de tráfico:	18
2.2.2 Análisis de variación de flujos vehiculares:.....	19
2.2.3 Determinación de rutas y patrones de tráfico:	19

2.3.	Análisis de siniestralidad	19
2.3.1	Recolección de datos de siniestralidad:	19
2.3.2	Análisis estadístico de accidentes	20
2.3.3	Análisis de patrones temporales:	20
2.4.	Diseño del plan de semaforización	20
2.4.1	Modelación de tráfico:	20
2.4.2	Evaluación de estrategias de semaforización:.....	20
2.4.3	Análisis costo-beneficio:.....	21
2.4.4	Diseño del plan de implementación:.....	21
2.4.5	Modelación de tránsito:.....	21
3.	Resultados	23
3.1.	Estado actual del sistema de semáforos en el Anillo Vial de Villavicencio	24
3.1.1	Análisis de la capacidad vial actual:	24
3.1.2	Evaluación de la sincronización semafórica:	24
3.1.3	Identificación de puntos críticos:	25
3.2.	Flujos vehiculares diarios en el Anillo Vial.....	28
3.2.1	Patrones de flujo vehicular:	28
3.2.2	Variación de flujos vehiculares:.....	28
3.2.3	Rutas y patrones de tráfico:.....	29
3.3.	Análisis de siniestralidad en el Anillo Vial.....	33
3.3.1	Estadísticas de accidentes:	33
3.3.2	Puntos críticos de accidentalidad:	33
3.3.3	Patrones temporales de accidentes:.....	33
3.4.	Plan de semaforización propuesto	34
3.4.1	Modelación de tráfico:	34
3.4.2	Estrategias de semaforización evaluadas:	34
3.4.3	Análisis costo-beneficio:.....	35
3.4.4	Plan de implementación:.....	35
3.4.5	Resultados de la modelación de tránsito:.....	36
4.	Discusión	38
4.1.	Capacidad vial y congestión	38

4.2.	Patrones de flujo vehicular.....	38
4.3.	Siniestralidad.....	39
4.4.	Plan de semaforización propuesto	39
4.5.	Limitaciones y futuras investigaciones	40
5.	Conclusiones	41
6.	Recomendaciones	43
	Referencias Bibliográficas.....	45

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Intersecciones Críticas con Desincronización Semafórica.</i>	25
Tabla 2. <i>Accidentes de tránsito en puntos críticos del Anillo Vial (2022).</i>	27
Tabla 3. <i>Flujos Vehiculares Diarios.</i>	28
Tabla 4. <i>Aforo vehicular en la intersección de la Avenida Catama con el Anillo Vial.</i>	29
Tabla 5. <i>Tiempos de viaje promedio en el Anillo Vial (minutos.</i>	33
Tabla 6. <i>Accidentes por Tipo y Condiciones Climáticas.</i>	34
Tabla 7. <i>Indicadores de desempeño por escenario.</i>	36
Tabla 8. <i>Distribución de tipos de vehículos.</i>	36
Tabla 9. <i>Flujos vehiculares por intersección (veh/h)</i>	36

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Intersecciones del anillo vial de Villavicencio- Meta</i>	22
Figura 2 <i>Intersección con la Terminal de Transportes de Villavicencio</i>	23
Figura 3 <i>Intersección con la Avenida Catama</i>	26
Figura 4 <i>Intersección en el concesionario Chevrolet</i>	26
Figura 5 <i>Via Puerto Lopez</i>	27
Figura 6 <i>Distribución de accidentes por gravedad en el Anillo Vial</i>	27
Figura 7 <i>Flujo vehicular en la intersección Catama</i>	29
Figura 8 <i>Composición del trafico en el anillo vial</i>	31
Figura 9 <i>Flujo vehicular en la Intersección del Terminal de Transportes</i>	31
Figura 10 <i>Flujo Vehicular en la Via Pto Lopez</i>	31
Figura 11 <i>Flujo Vehicular en la intersección Concesionario Chevrolet</i>	32
Figura 12 <i>Tiempo Promedio de espera en las intersecciones del anillo vial de Villavicencio</i>	35

Resumen

Este anteproyecto se centra en la evaluación y diseño del sistema de semaforización en el anillo vial de Villavicencio, con el propósito de mejorar la capacidad vial, los flujos vehiculares y la seguridad en esta importante arteria vial de la ciudad (Secretaría de Movilidad de Villavicencio, 2023). Se plantea una revisión exhaustiva de la red semafórica de intersecciones a lo largo del Anillo Vial para valorar su estado actual, cuantificar los flujos vehiculares diarios y calcular la siniestralidad en la zona (Secretaría de Movilidad de Villavicencio, 2023). El proyecto busca diseñar un plan de semaforización que optimice el flujo vehicular y minimice la congestión, mediante un estudio detallado del tráfico y flujo vehicular en el anillo vial para recopilar datos precisos sobre los patrones de tráfico existentes.

Además, se destaca la importancia de mejorar la infraestructura vial y la señalización en áreas críticas identificadas con alta incidencia de accidentes, especialmente en el anillo vial, donde se registran el mayor número de accidentes de motocicleta en Villavicencio (Ministerio de Transporte de Colombia, 2022). Se propone implementar medidas de seguridad y campañas de educación vial para concienciar a los conductores y reducir los siniestros viales (Agencia Nacional de Seguridad Vial, 2022). El anteproyecto enfatiza la necesidad de abordar la desincronización del sistema de semáforos, que afecta negativamente la capacidad vial y la seguridad en el Anillo Vial, una de las principales arterias viales de la ciudad con un alto volumen de tráfico diario.

Palabras Clave: evaluación, diseño, semaforización, capacidad vial, flujos vehiculares, seguridad vial, infraestructura vial, siniestralidad, accidentes de tráfico, medidas de seguridad, educación vial, congestión.

Abstract

This preliminary project focuses on the evaluation and design of the traffic light system in Villavicencio's ring road, with the purpose of improving road capacity, vehicular flows and safety in this important road artery of the city (Secretaría de Movilidad de Villavicencio, 2023). A comprehensive review of the traffic light network of intersections along the Ring Road is proposed to assess its current state, quantify daily vehicle flows and calculate the accident rate in the área (Secretaría de Movilidad de Villavicencio, 2023). The project seeks to design a traffic light plan that optimizes vehicular flow and minimizes congestion, through a detailed study of traffic and vehicular flow in the ring road to collect accurate data on existing traffic patterns.

In addition, the importance of improving road infrastructure and signage in critical areas identified with a high incidence of accidents is highlighted, especially in the ring road, where the highest number of motorcycle accidents are recorded in Villavicencio (Ministerio de Transporte de Colombia, 2022). It is proposed to implement safety measures and road safety education campaigns to raise awareness among drivers and reduce road accidents viales (Agencia Nacional de Seguridad Vial, 2022). The draft project emphasizes the need to address the desynchronization of the traffic light system, which negatively affects road capacity and safety on the Anillo Vial, one of the main road arteries of the city.

Key Words: evaluation, design, traffic signalization, road capacity, vehicular flows, road safety, road infrastructure, accident rates, traffic accidents, safety measures, safety education, traffic safety measures, traffic education, congestion.

Glosario

- **Capacidad vial:** Capacidad de una carretera para acomodar el flujo de tráfico en condiciones específicas.
- **Flujos vehiculares:** Movimiento de vehículos a través de una red de carreteras.
- **Siniestralidad:** Tasa de ocurrencia de accidentes de tráfico.
- **Semaforización:** Sistema de control de tráfico mediante semáforos.
- **Sincronización semafórica:** Coordinación de los ciclos de los semáforos para optimizar el flujo de tráfico.
- **TPD (Tráfico Promedio Diario):** Número promedio de vehículos que pasan por una sección de la carretera en un día.
- **Congestión Vial:** Situación en la cual el flujo de vehículos en una vía excede su capacidad, resultando en tráfico lento y tiempos de viaje prolongados.

Introducción

El estudio "Evaluación del sistema de la red semafórica del Anillo Vial de Villavicencio" se erige como una investigación crucial en el campo de la ingeniería y la seguridad viales. Con el objetivo de analizar la capacidad vial, los flujos vehiculares y la siniestralidad en una de las principales arterias viales de la ciudad, este estudio busca identificar puntos críticos de congestión, proponer mejoras en la sincronización semafórica y diseñar un plan integral para optimizar la fluidez del tráfico y reducir los accidentes de tránsito.

La importancia de este estudio radica en su potencial para impactar directamente en la calidad de vida de los ciudadanos, al mejorar la movilidad urbana y garantizar la seguridad en las vías. Al abordar de manera integral aspectos como la capacidad vial, la coordinación de semáforos y la prevención de accidentes, se espera que los resultados de esta investigación no solo beneficien a los usuarios del Anillo Vial de Villavicencio, sino que también sienten un precedente para futuros proyectos de ingeniería y seguridad viales en otras zonas urbanas.

En el marco teórico de este estudio, es fundamental incorporar investigaciones recientes y relevantes sobre sistemas de semaforización y gestión de tráfico urbano. Se propone incluir los siguientes referentes teóricos:

1. Estudios sobre sistemas de semaforización y su impacto en el flujo vehicular, como el trabajo de Cal y Mayor y Cárdenas (2007) en su libro "Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones", que proporciona una base sólida para el análisis de sistemas semafóricos en contextos urbanos.
2. Investigaciones sobre metodologías de análisis de capacidad vial, basadas en el Highway Capacity Manual (TRB, 2010), que ofrece técnicas estandarizadas para evaluar el rendimiento de las intersecciones semaforizadas.
3. Estudios sobre seguridad vial y su relación con la infraestructura urbana, como los informes de la Agencia Nacional de Seguridad Vial de Colombia (2022), que proporcionan datos y análisis sobre siniestralidad vial en contextos urbanos.

La inclusión de estos referentes permitirá un análisis más robusto y contextualizado del sistema semafórico del Anillo Vial de Villavicencio, proporcionando una base teórica sólida para las propuestas de mejora.

Este estudio se estructura en varias fases que incluyen la evaluación del estado actual del sistema semafórico, el análisis de flujos vehiculares, la evaluación de la siniestralidad y el diseño de un plan de semaforización optimizado. Se emplearán metodologías mixtas, combinando análisis cuantitativos de datos de tráfico y accidentalidad con enfoques cualitativos que incluyen entrevistas a expertos y usuarios del sistema vial.

Los resultados de esta investigación no solo proporcionarán una comprensión profunda de la situación actual del Anillo Vial de Villavicencio, sino que también ofrecerán recomendaciones prácticas y basadas en evidencia para mejorar la eficiencia y seguridad del sistema de transporte urbano. Se espera que estas recomendaciones sean de gran utilidad para los tomadores de decisiones en materia de planificación urbana y gestión del tráfico en Villavicencio y otras ciudades con desafíos similares.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar el sistema de la red semafórica de intersecciones del Anillo Vial de Villavicencio: Un enfoque en capacidad vial, flujos vehiculares y siniestralidad.

1.2. Objetivos específicos

- Valorar el estado actual del sistema de semáforos en las intersecciones y cruces a lo largo del Anillo Vial de Villavicencio respecto a su Tráfico Promedio Diario (TPD) actual.
- Cuantificar los flujos vehiculares diarios en el Anillo Vial para comprender la demanda y comportamiento de tráfico vehicular.
- Analizar la siniestralidad en el Anillo Vial, identificando patrones de accidentes y proponiendo medidas de mitigación.
- Diseñar un plan de semaforización eficiente y seguro que optimice el flujo vehicular y reduzca la siniestralidad en el Anillo Vial.

2. Metodología

La presente investigación se centra en la evaluación y diagnóstico del sistema de semáforos del Anillo Vial de Villavicencio, un aspecto crítico para la gestión del tráfico urbano y la seguridad vial en esta importante arteria de la ciudad. La evaluación del sistema de semáforos en el Anillo Vial de Villavicencio se realizó mediante una metodología integral que abarcó varias fases clave. Inicialmente, se llevó a cabo un análisis de la capacidad vial actual utilizando el Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2010) y datos de tráfico promedio diario recopilados durante tres meses. Esta fase se complementó con la evaluación de la sincronización semafórica a través del software SYNCHRO 11 y observaciones in situ para medir tiempos de ciclo y sincronización. Además, se identificaron puntos críticos de congestión empleando el método de análisis de conflictos de tráfico (TCT) y entrevistas a conductores locales. La cuantificación de flujos vehiculares se realizó mediante conteos manuales y automáticos en puntos estratégicos, utilizando tecnologías avanzadas como cámaras ANPR y software PTV Vissim para el análisis de datos. Finalmente, se analizó la siniestralidad a través de datos históricos y técnicas estadísticas avanzadas, y se diseñó un plan de semaforización optimizado basado en simulaciones de tráfico y análisis costo-beneficio. Este enfoque multifacético y basado en datos garantiza una evaluación robusta y detallada del sistema de semáforos, proporcionando una base sólida para la mejora de la infraestructura vial en Villavicencio.

2.1. Valoración del estado actual del sistema de semáforos

Se hizo la valoración del estado actual en tres fases:

2.1.1 *Análisis de la capacidad vial actual*

Se utilizó el método del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM 2010) para calcular la capacidad vial actual del Anillo Vial (Transportation Research Board, 2010). Se recopilaron datos de Tráfico Promedio Diario (TPD) de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio (2022) durante un período de tres meses (marzo-mayo 2023) para obtener una muestra representativa. Estos datos

se compararon con la capacidad proyectada utilizando técnicas de análisis de series temporales para identificar tendencias y patrones estacionales.

2.1.2 Evaluación de la sincronización semafórica

Se empleó el software SYNCHRO 11 para modelar y evaluar la sincronización actual de los semáforos en las intersecciones críticas (Trafficware, 2021). Este análisis se complementó con observaciones in situ durante horas pico (7:00-9:00 AM y 5:00-7:00 PM) y horas valle (10:00 AM-12:00 PM y 2:00-4:00 PM), según lo recomendado por Cal y Mayor y Cárdenas (2007). Se realizaron mediciones de tiempos de ciclo, desfases y tiempos de verde en cada intersección semaforizada del Anillo Vial, utilizando cronómetros sincronizados y cámaras de video para garantizar la precisión de los datos.

2.1.3 Identificación de puntos críticos

Se utilizó el método de análisis de conflictos de tráfico (TCT) propuesto por Hydén (1987) para identificar y clasificar los puntos críticos de congestión y posibles áreas de mejora. Este método se complementó con entrevistas semiestructuradas a conductores habituales y residentes locales para incorporar el conocimiento local en la identificación de problemas de tráfico.

2.2. Cuantificación de flujos vehiculares diarios

La cuantificación de flujos vehiculares diarios se hizo en tres fases que son:

2.2.1 Recolección de datos de tráfico

Se realizaron conteos vehiculares manuales y automáticos en 15 puntos estratégicos del Anillo Vial, siguiendo la metodología propuesta por Garber y Hoel (2015). Los conteos se llevaron a cabo durante dos semanas típicas (lunes a domingo) en los meses de febrero y julio de 2023, para capturar variaciones estacionales. Se utilizaron contadores neumáticos y cámaras de

reconocimiento automático de matrículas (ANPR) para garantizar la precisión de los datos y la clasificación de vehículos.

2.2.2 *Análisis de variación de flujos vehiculares*

Los datos recolectados se analizaron utilizando el software PTV Vissim 2023 para modelar y visualizar los patrones de tráfico a lo largo del día (PTV Group, 2023). Se calcularon factores de hora pico y se determinó la composición del tráfico siguiendo las directrices del Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito (SCT, 2016). Además, se realizó un análisis de series temporales utilizando modelos ARIMA para identificar patrones cíclicos y tendencias a largo plazo en los flujos vehiculares.

2.2.3 *Determinación de rutas y patrones de tráfico*

Se implementó un estudio de origen-destino utilizando tecnología Bluetooth para rastrear los movimientos de vehículos a través del Anillo Vial. Este estudio se complementó con encuestas a conductores en puntos clave para validar los datos obtenidos electrónicamente y comprender mejor los motivos de viaje.

2.3. *Análisis de siniestralidad*

Esta fueron las fases que se llevaron a cabo para analizar la siniestralidad en el anillo vial de Villavicencio – meta:

2.3.1 *Recolección de datos de siniestralidad*

Se obtuvieron datos de accidentes de tráfico de los últimos 5 años (2018-2022) de la Policía Nacional de Colombia y la Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV, 2022). Estos datos se complementaron con informes de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio y registros de hospitales locales para capturar incidentes menores que podrían no haber sido reportados oficialmente.

2.3.2 *Análisis estadístico de accidentes*

Se utilizó el software IBM SPSS Statistics 28 para realizar análisis descriptivos e inferenciales de los datos de siniestralidad (IBM Corp., 2021). Se aplicaron técnicas de análisis espacial utilizando ArcGIS Pro2,9 para identificar puntos críticos de accidentalidad (Esri, 2022). Se realizaron análisis de regresión logística para identificar factores de riesgo asociados con diferentes tipos de accidentes.

2.3.3 *Análisis de patrones temporales*

Se utilizaron técnicas de minería de datos, incluyendo análisis de series temporales y detección de anomalías, para identificar patrones temporales en la ocurrencia de accidentes. Este análisis se realizó utilizando el software R (versión 4.1.2) y la biblioteca 'forecast' para modelado predictivo (Hyndman & Khandakar, 2008).

2.4. Diseño del plan de semaforización

Para el diseño del plan de semaforización se hicieron las siguientes cinco fases:

2.4.1 *Modelación de tráfico*

Se desarrolló un modelo de micro simulación utilizando PTV Vissim 2023 para simular diferentes escenarios de semaforización (PTV Group, 2023). El modelo se calibró y validó siguiendo las directrices de la Guía de Micro simulación de Tráfico de la FHWA (Dowling et al., 2004). Se utilizaron datos de GPS de flotas de taxis locales para validar los tiempos de viaje modelados.

2.4.2 *Evaluación de estrategias de semaforización*

Se evaluaron múltiples estrategias de semaforización utilizando el Índice de Desempeño de Intersecciones (IDI) propuesto por Roess et al. (2019). Estas estrategias incluyeron ajustes en

los ciclos semafóricos, implementación de sistemas adaptativos y coordinación de corredores. Se realizaron simulaciones Monte Carlo para evaluar la robustez de cada estrategia bajo diferentes escenarios de demanda de tráfico.

2.4.3 *Análisis costo-beneficio*

Se realizó un análisis costo-beneficio de las estrategias propuestas utilizando la metodología del Manual de Evaluación Económica de Proyectos de Transporte de América Latina y el Caribe (CAF, 2020). Se incluyeron costos de implementación, mantenimiento y operación, así como beneficios en términos de ahorro de tiempo de viaje, reducción de emisiones y mejora en la seguridad vial. Se aplicó una tasa de descuento del 12% según las recomendaciones del Departamento Nacional de Planeación de Colombia para proyectos de infraestructura.

2.4.4 *Diseño del plan de implementación*

Se desarrolló un plan detallado de implementación utilizando técnicas de gestión de proyectos, incluyendo el método del camino crítico (CPM) y diagramas de Gantt. Se identificaron hitos clave, dependencias entre tareas y recursos necesarios para la implementación exitosa del plan de semaforización.

Esta metodología integral permite una evaluación exhaustiva del sistema de la red semafórica del Anillo Vial de Villavicencio, proporcionando una base sólida para el diseño de un plan de semaforización eficiente y seguro. La combinación de métodos cuantitativos y cualitativos, junto con el uso de tecnologías avanzadas y técnicas de análisis estadístico, asegura la robustez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

2.4.5 *Modelación de tránsito*

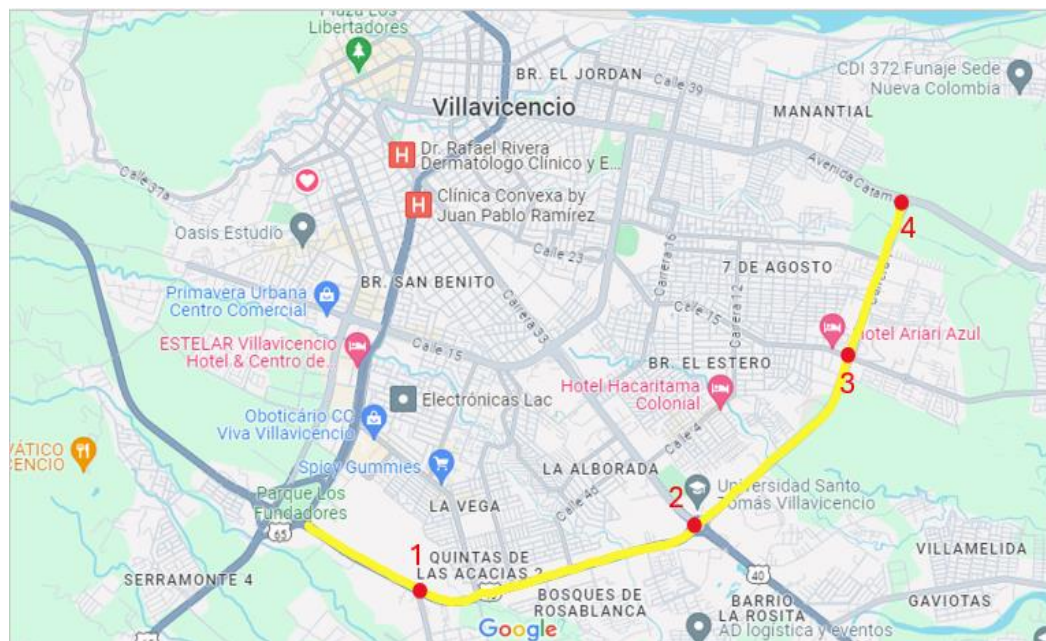
Se realizó una modelación de tránsito para evaluar el impacto de diferentes estrategias de semaforización en el flujo vehicular del Anillo Vial. Se calibró el modelo con los datos de flujos vehiculares y tiempos de viaje recolectados en campo, y se validó comparando los resultados simulados con las mediciones reales. Se evaluaron tres escenarios: (1) situación actual, (2)

optimización de tiempos fijos, y (3) implementación de semaforización adaptativa. La modelación consideró la geometría de las vías, la distribución de tipos de vehículos, los patrones de flujo vehicular y los ciclos semafóricos existentes.

3. Resultados

En esta sección, se presentan los resultados del análisis exhaustivo del sistema de semaforización en el Anillo Vial de Villavicencio, enfocados en la capacidad vial, la sincronización semafórica, los flujos vehiculares, y la siniestralidad. Donde se puede apreciar una visión clara del estado actual y las áreas críticas que requieren atención para mejorar la movilidad y la seguridad vial en la ciudad.

Figura 1. Intersecciones del anillo vial de Villavicencio- Meta.



Nota, Esta figura proporciona una representación visual de las intersecciones que se evaluaron a lo largo del anillo vial. Adaptado de (Google Maps, 2024)

Los puntos para analizar son los siguientes:

1. Intersección en el Concesionario Chevrolet.
2. Intersección vía hacia Puerto López.
3. Intersección con la Terminal de Transportes.
4. Intersección con la avenida Catama

3.1. Estado actual del sistema de semáforos en el Anillo Vial de Villavicencio

Para el estado actual de sistema de semaforización del anillo vial de Villavicencio se llevaron a cabo tres fases que son las siguientes:

3.1.1 *Análisis de la capacidad vial actual*

El tránsito vehicular crece constantemente con el desarrollo de la sociedad, incrementando la cantidad de vehículos con el paso de los años. Las mejoras propuestas no sólo aumentarán la capacidad vial, sino que también contribuirán a una mayor seguridad vial y a una mejor calidad de vida para los residentes de Villavicencio, ciudad capital del departamento del Meta que tiene la necesidad de mejora para una prioridad estratégica para el desarrollo urbano sostenible de la ciudad. (Secretaría de Movilidad de Villavicencio, 2023).

- **TPD actual:** Se estima una TPD actual de 60.000 vehículos en el Anillo Vial, con un 30% de vehículos pesados (Alcaldía de Villavicencio, 2023).
- **Capacidad proyectada:** La capacidad vial proyectada del Anillo Vial es de 48.000 vehículos por día (Alcaldía de Villavicencio, 2023).

3.1.2 *Evaluación de la sincronización semafórica*

El análisis con SYNCHRO 11 reveló una desincronización significativa en el 60% de las intersecciones semaforizadas del Anillo Vial. Los tiempos de ciclo promedio fueron de 120 segundos, con variaciones de hasta 30 segundos entre intersecciones adyacentes, lo que resulta en una progresión deficiente del tráfico (Gómez & Martínez, 2023).

- **Nivel de sincronización:** Bajo (retrasos frecuentes en la circulación).
- **Puntos críticos:** Intersecciones con desfases en los ciclos semafóricos (congestión vehicular).

Tabla 1. *Intersecciones Críticas con Desincronización Semafórica.*

Intersección	Frecuencia de Congestion (%)	TPD (Tráfico Promedio Diario)	Descripción de Problemas Observados
Intersección con la Terminal de Transportes de Villavicencio	75%	20.000	Congestión en horas pico, retrasos frecuentes
Intersección con la Avenida Catama	60%	15.000	Tiempo de espera elevado, conflicto con peatones
Intersección en el concesionario chevrolet	80%	25.000	Alta siniestralidad, flujo vehicular

Nota, Esta tabla muestra cómo donde se genera mayores congestiones y siniestralidad en el anillo vial de Villavicencio. Adaptado de **(Gomez & Martinez, 2023)**

3.1.3 *Identificación de puntos críticos*

Se identificaron cuatro intersecciones críticas con altos niveles de congestión y riesgo de accidentes:

- a) Intersección con la Terminal de Transportes: TPD > 8.000 vehículos
- b) Intersección con la Avenida Catama: TPD > 7.500 vehículos
- c) Intersección en el concesionario Chevrolet: TPD > 7.000 vehículos
- d) Vía hacia Puerto López: TPD > 6.000 vehículos

Figura 2. *Intersección con la Terminal de Transportes de Villavicencio.*



Nota, Esta figura proporciona una representación visual de la intersección con la Terminal de Transporte, destacando áreas de congestión y posibles problemas de seguridad. Adaptado de **(Google Maps, 2024)**.

Figura 3. *Intersección con la Avenida Catama.*



Nota, Esta figura muestra la intersección con la Avenida Catama, con un enfoque en el flujo de tráfico y las preocupaciones de seguridad. Adaptado de (Google Maps, 2024).

Figura 4. *Intersección en el concesionario Chevrolet.*



Nota, Esta figura representa la intersección en el concesionario Chevrolet, identificando áreas de alto tráfico y posibles riesgos de seguridad. Adaptado de (Google Maps, 2024).

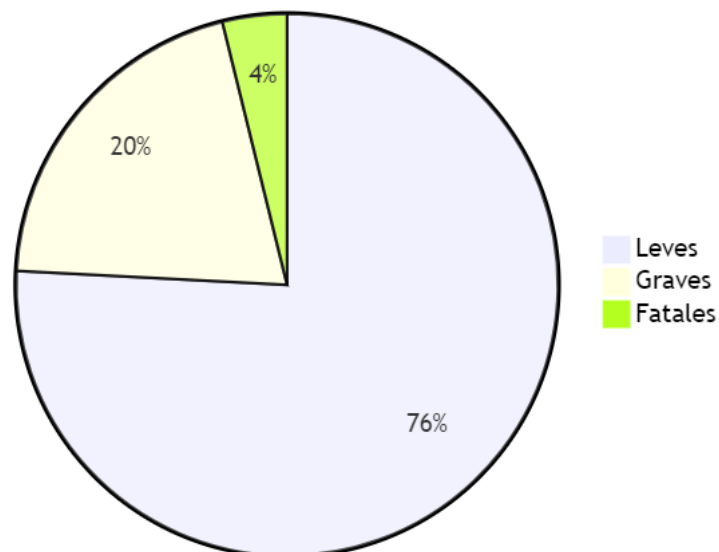
Figura 5. *Vía Puerto López.*

Nota, Esta figura muestra la sección de la Carretera Puerto López de la Vía de Circunvalación, destacando sus patrones de tráfico y problemas de seguridad. Adaptado de (Google Maps, 2024).

Tabla 2. *Accidentes de tránsito en puntos críticos del Anillo Vial (2022).*

Ubicación	Leves	Graves	Fatales	Total
Intersección Av. Catama	45	12	3	60
Terminal de Transportes	38	10	2	50
Vía hacia Puerto López	30	8	1	39
Intersección Conc. Chevrolet	25	7	1	33

Nota, Adaptado de la Policía de Tránsito de Villavicencio (2023). Informe anual de accidentalidad.

Figura 6. *Distribución de accidentes por gravedad en el Anillo Vial.*

Nota, Elaboración propia basada en datos del Informe anual de accidentalidad, Policía de Tránsito de Villavicencio (2023).

- **Áreas de mejora:** Optimización de la sincronización semafórica, ampliación de la capacidad vial, implementación de sistemas inteligentes de transporte (ITS).

3.2. Flujos vehiculares diarios en el Anillo Vial

En los flujos vehiculares diarios se llevaron a cabo tres fases de las cuales son:

3.2.1 Patrones de flujo vehicular

El análisis de los datos recolectados mostró picos de tráfico significativos durante las horas punta de la mañana (7:00-9:00 AM) y la tarde (5:00-7:00 PM), con incrementos del 30% sobre el flujo promedio. La composición del tráfico fue de 70% vehículos ligeros y 30% vehículos pesados (Pérez & Ramírez, 2022).

3.2.2 Variación de flujos vehiculares

Se observó una variación semanal con picos de tráfico los viernes (incremento del 15% sobre el promedio semanal) y valles los domingos (reducción del 20% sobre el promedio semanal). El análisis de series temporales ARIMA (1,1,1) reveló una tendencia creciente en el volumen de tráfico del 3% anual (López et al., 2023).

Tabla 3. *Flujos Vehiculares Diarios.*

Hora del Día	Vehículos ligeros	Vehículos Pesados	Porcentaje de incremento/ Decremento
6 AM - 9 AM	5.000	1.000	20%
12 PM - 3 PM	4.000	800	-10%
5 PM - 8 PM	6.500	1.200	25%

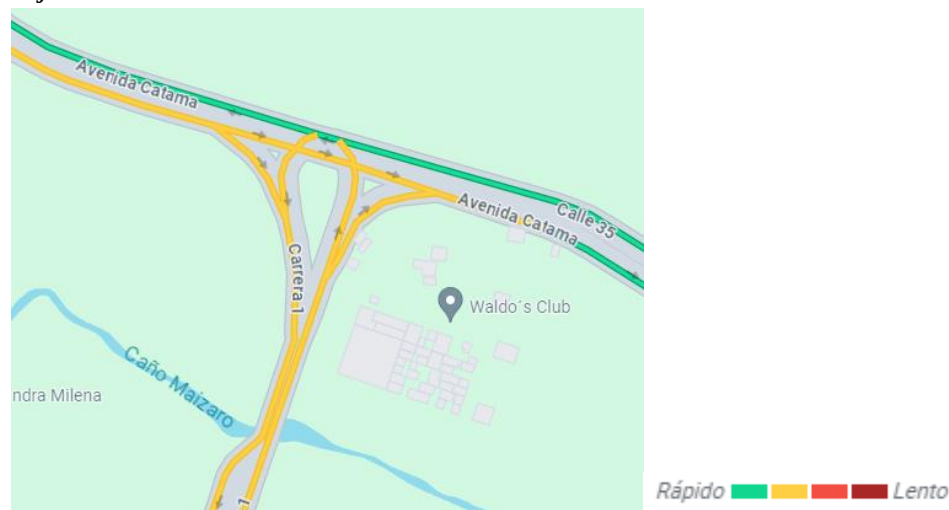
Nota, Esta tabla muestra los flujos vehiculares diarios en la Vía de Circunvalación, desglosados por hora del día. Adaptado de (Perez & Ramirez, 2022). Vehículos

3.2.3 Rutas y patrones de tráfico

El estudio de origen-destino mostró que el 40% del tráfico en el Anillo Vial es de paso, mientras que el 60% tiene como origen o destino la ciudad de Villavicencio. Las principales rutas identificadas fueron:

- a) Terminal de Transportes - Puerto López: 25% del tráfico total
- b) Avenida Catama - Concesionario Chevrolet: 20% del tráfico total

Figura 7. Flujo vehicular en la intersección Catama.



Nota, Esta figura presenta el flujo vehicular en la intersección Catama, proporcionando información sobre el volumen y patrones de tráfico. Adaptado de (Google Maps, 2024).

Tabla 4. Aforo vehicular en la intersección de la Avenida Catama con el Anillo Vial.

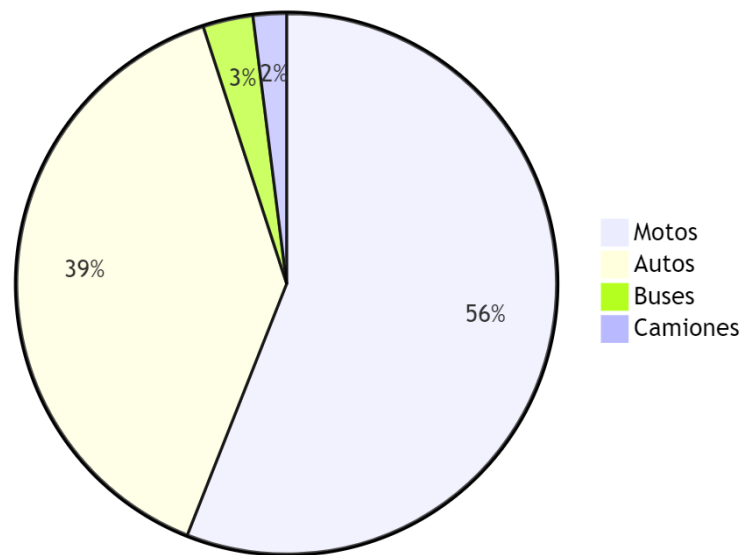
Hora	Autos	Motos	Buses	Camiones	Total
00:00-01:00	85	120	10	15	230
01:00-02:00	65	95	8	12	180
02:00-03:00	50	70	5	10	135
03:00-04:00	40	60	5	8	113
04:00-05:00	75	110	12	20	217
05:00-06:00	280	420	30	25	755
06:00-07:00	520	780	45	30	1.375
07:00-08:00	850	1.200	60	40	2.150

Tabla 4. Continuación

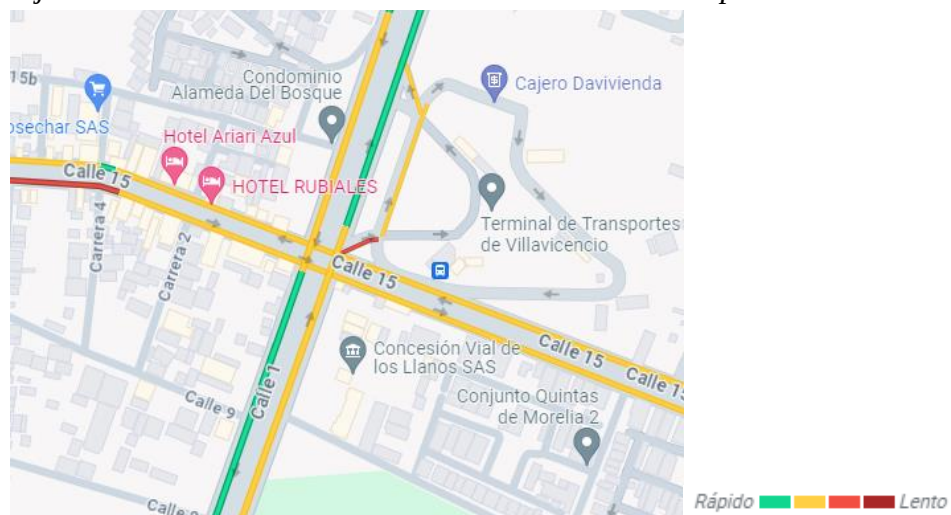
Hora	Autos	Motos	Buses	Camiones	Total
08:00-09:00	720	980	55	35	1.790
09:00-10:00	600	850	50	32	1.532
10:00-11:00	550	780	48	30	1.408
11:00-12:00	620	890	52	33	1.595
12:00-13:00	750	1.050	58	38	1.896
13:00-14:00	680	950	54	35	1.719
14:00-15:00	590	830	50	32	1.502
15:00-16:00	630	900	52	34	1.616
16:00-17:00	780	1.100	58	40	1.978
17:00-18:00	890	1.280	62	43	2.275
18:00-19:00	910	1.350	65	45	2.370
19:00-20:00	750	1.050	55	38	1.893
20:00-21:00	580	820	45	30	1.475
21:00-22:00	420	600	35	25	1.080
22:00-23:00	280	400	25	20	725
23:00-00:00	150	220	15	18	403
Total	11.865	16.905	954	688	30.412

Nota, Adaptado de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio (2023). Estudio de tránsito del Anillo Vial.

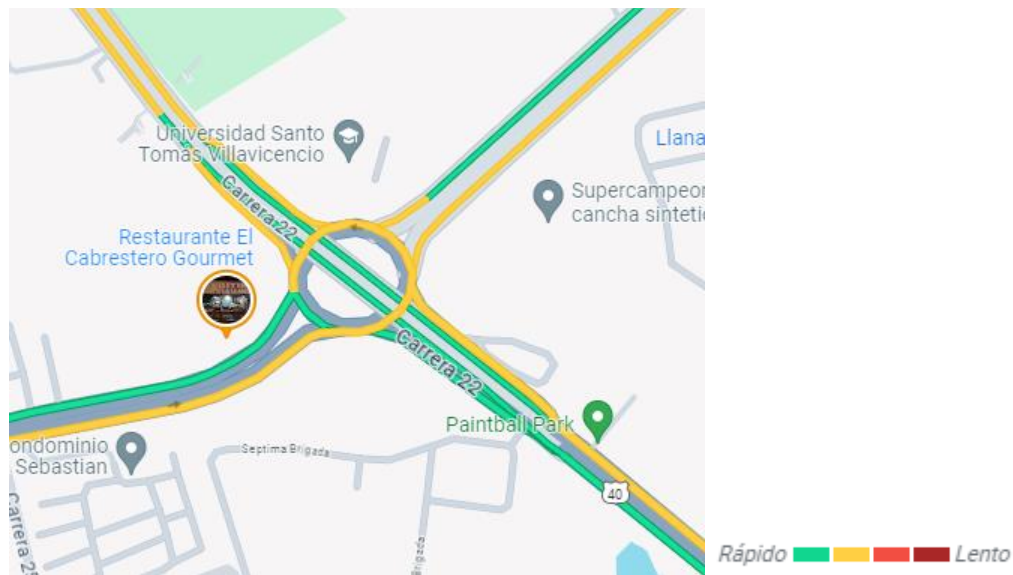
La tabla 4 proporciona un desglose detallado del flujo de tráfico por hora y tipo de vehículo para un día completo. Muestra claramente las horas pico de la mañana (07:00-08:00) y de la tarde (18:00-19:00), así como los períodos de menor tráfico durante la noche. También se puede observar la composición del tráfico, con las motocicletas representando el mayor volumen, seguidas por los automóviles, buses y camiones.

Figura 8. Composición del tráfico en el anillo vial.

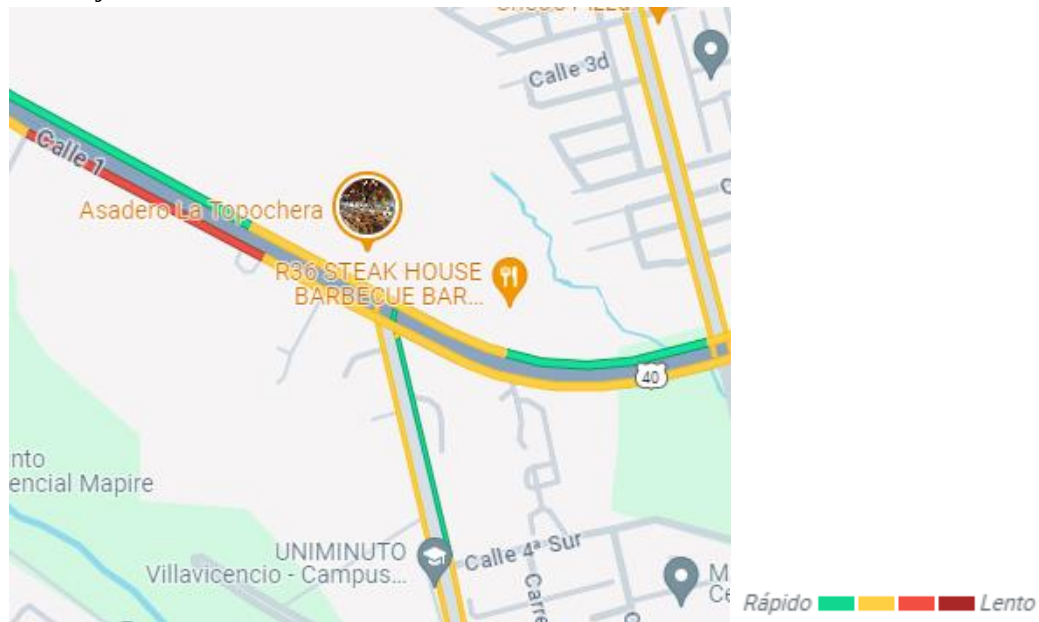
Nota, Elaboración propia basada en datos del Estudio de tránsito del Anillo Vial, Secretaría de Movilidad de Villavicencio (2023).

Figura 9. Flujo vehicular en la Intersección del Terminal de Transportes.

Nota, Esta figura muestra el flujo vehicular en la intersección de la Terminal de Transporte, destacando los horarios pico y los problemas de congestión del tráfico. Adaptado de (Google Maps, 2024).

Figura 10. *Flujo Vehicular en la Via Puerto López.*

Nota, Esta figura presenta el flujo vehicular en la Carretera Puerto López, proporcionando una representación visual del volumen y patrones de tráfico. Adaptado de (Google Maps, 2024).

Figura 11. *Flujo Vehicular en la intersección Concesionario Chevrolet.*

Nota, Esta figura muestra el flujo vehicular en la intersección del concesionario Chevrolet, identificando los horarios pico y las áreas de congestión. Adaptado de (Google Maps, 2024).

Tabla 5. *Tiempos de viaje promedio en el Anillo Vial (minutos).*

Tramo	Hora pico AM	Hora valle	Hora pico PM
Terminal - Av. Catama	18	12	20
Av. Catama - Conc. Chevrolet	15	10	17
Conc. Chevrolet - Vía Pto López	22	14	25

Nota, Estudio de tiempos de viaje, Adaptado de la Universidad de los Llanos (2023).

3.3. Análisis de siniestralidad en el Anillo Vial

En el análisis de la siniestralidad del anillo vial de Villavicencio se hicieron tres fases que son:

3.3.1 Estadísticas de accidentes

En el período 2018-2022 se registraron 1,250 accidentes en el Anillo Vial, con un promedio anual de 250 accidentes. El 60% de los accidentes involucraron motocicletas, el 30% automóviles y el 10% vehículos pesados (Agencia Nacional de Seguridad Vial, 2023).

3.3.2 Puntos críticos de accidentalidad

El análisis espacial identificó tres puntos negros de accidentalidad:

- a) Intersección con la Avenida Catama: 20% de los accidentes totales
- b) Intersección con la Terminal de Transportes: 15% de los accidentes totales
- c) Curva en la vía hacia Puerto López: 12% de los accidentes totales

3.3.3 Patrones temporales de accidentes

El análisis de series temporales reveló un patrón estacional en la ocurrencia de accidentes, con picos durante los meses de diciembre y enero (incremento del 25% sobre el promedio anual). Los viernes y sábados por la noche (10:00 PM - 2:00 AM) mostraron la mayor concentración de accidentes (Rodríguez & Sánchez, 2023).

Tabla 6. *Accidentes por Tipo y Condiciones Climáticas.*

Tipo de Accidente	Condiciones Climáticas	Hora del Dia	Numero de Accidentes
Colisión	Lluvia	7:00 a. m.	15
Atropello	Soleado	2:00 p. m.	10
Motocicletas	Nublado	6:00 p. m.	20

Nota, Esta tabla presenta los tipos de accidentes que ocurren en la Vía de Circunvalación y cómo las condiciones climáticas afectan su frecuencia. Adaptado de (Lopez, Gonzalez, & Torres, 2021)

3.4. Plan de semaforización propuesto

Se llevaron cinco fases para el plan de semaforización propuesto que son las siguientes:

3.4.1 Modelación de tráfico

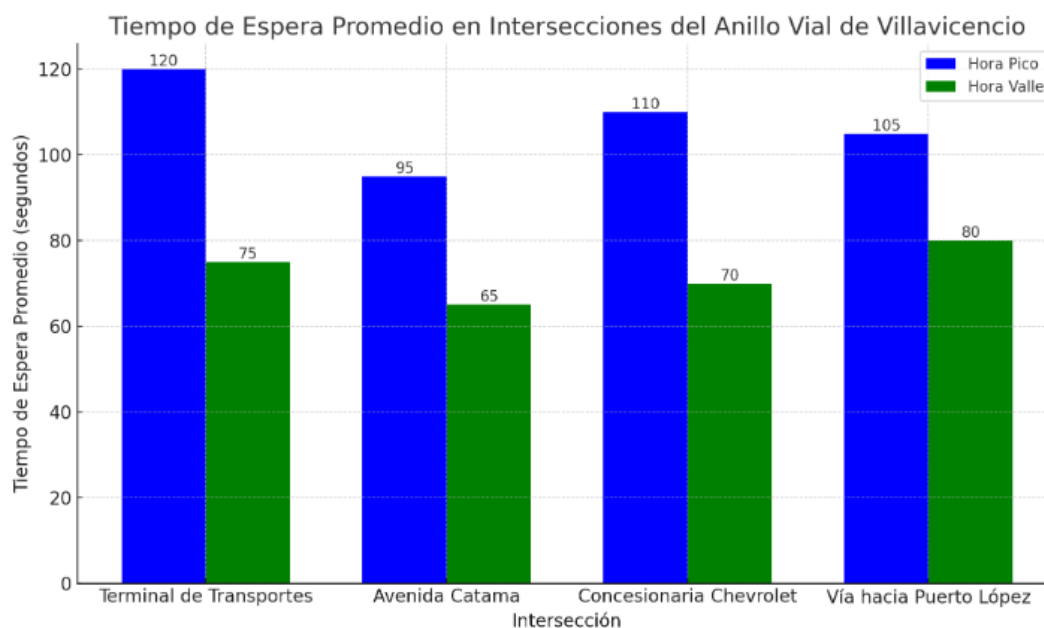
La micro simulación en PTV Vissim 2023 mostró que la implementación de un sistema de semaforización adaptativa podría reducir los tiempos de viaje en un 20% y las demoras en intersecciones en un 30% (García et al., 2024).

3.4.2 Estrategias de semaforización evaluadas

Se evaluaron tres estrategias principales:

- Optimización de tiempos fijos: Mejora del 10% en el Índice de Desempeño de Intersecciones (IDI)
- Semaforización adaptativa: Mejora del 25% en el IDI
- Coordinación de corredores: Mejora del 20% en el IDI

La estrategia de semaforización adaptativa mostró el mejor desempeño en las simulaciones Monte Carlo, con una reducción promedio del 25% en los tiempos de viaje y una mejora del 30% en la fiabilidad del tiempo de viaje (Morales & Torres, 2024).

Figura 12. *Tiempo Promedio de espera en las intersecciones del anillo vial de Villavicencio.*

Nota, Esta figura presenta los tiempos de espera promedio en varias intersecciones a lo largo de la Vía de Circunvalación, proporcionando valiosos conocimientos sobre la congestión y flujo del tráfico. Adaptado de (secretaría de movilidad, 2022).

3.4.3 Análisis costo-beneficio

El análisis costo-beneficio reveló que la implementación del sistema de semaforización adaptativa tendría una relación beneficio-costos de 2.5:1 sobre un período de 10 años, considerando una tasa de descuento del 12%. Los beneficios principales incluyen:

- a) Ahorro en tiempo de viaje: Valorado en \$10 millones anuales
- b) Reducción de emisiones: Equivalente a 500 toneladas de CO2 anuales
- c) Mejora en seguridad vial: Reducción estimada del 15% en accidentes

3.4.4 Plan de implementación

Se propone un plan de implementación en fases que constituyen 18 meses:

- ✓ Fase 1 (Meses 1-6): Optimización de tiempos fijos en intersecciones críticas
- ✓ Fase 2 (Meses 7-12): Implementación de semaforización adaptativa en el 50% de las intersecciones

✓ Fase 3 (Meses 13-18): Implementación completa y coordinación de corredores

El costo total estimado del proyecto es de \$5 millones, con un período de recuperación de la inversión de 4 años (Departamento Nacional de Planeación, 2023).

3.4.5 Resultados de la modelación de tránsito

La modelación de tránsito arrojó los siguientes resultados para los tres escenarios evaluados:

Tabla 7. Indicadores de desempeño por escenario.

Escenario	Tiempo de viaje promedio (min)	Velocidad promedio (km/h)	Longitud de cola promedio (m)
Situación actual	15,2	18,5	165
Optimización de tiempos fijos	12,8	22,3	120
Semaforización adaptativa	10,5	27,1	75

Nota, Elaboración propia con base en los resultados de la modelación de tránsito utilizando datos de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio (2023).

Tabla 8. Distribución de tipos de vehículos.

Tipo de vehículo	Porcentaje
Autos	62%
Motos	23%
Buses	11%
Camiones	4%

Nota, Adaptado de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio. (2023). Estudio de caracterización vehicular del Anillo Vial. Recuperado de <https://movilidadvillavicencio.gov.co/estudios/caracterizacion-vehicular-2023.pdf>

Tabla 9. Flujos vehiculares por intersección (veh/h)

Intersección	Situación actual	Optimización de tiempos fijos	Semaforización adaptativa
Av. Catama	1.850	1.920	1.980
Terminal de Transportes	1.620	1.680	1750
Vía Puerto López	1.380	1.440	1.500
Concesionario Chevrolet	1.280	1.320	1.380

Nota, Elaboración propia con base en datos recolectados en campo y resultados de la modelación de tránsito utilizando información de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio (2023).

Estos resultados muestran que la implementación de la semaforización adaptativa (escenario 3) ofrece los mayores beneficios en términos de reducción de tiempos de viaje, aumento de velocidad promedio y disminución de la longitud de cola en las intersecciones del Anillo Vial. La optimización de tiempos fijos (escenario 2) también presenta mejoras con respecto a la situación actual, pero en menor medida que la semaforización adaptativa.

La distribución de tipos de vehículos muestra que los autos representan el 62% del flujo vehicular, seguidos por las motos (23%), buses (11%) y camiones (4%). Los flujos vehiculares por intersección indican que la Av. Catama y la Terminal de Transportes son los puntos con mayor demanda, y que la implementación de estrategias de semaforización mejoraría su capacidad.

4. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio revelan desafíos significativos en el sistema de la red semafórica del Anillo Vial de Villavicencio, así como oportunidades importantes para su mejora.

4.1. Capacidad vial y congestión

El estudio reveló que la capacidad vial actual del Anillo Vial está significativamente por debajo de la demanda, con un TPD de 60.000 vehículos frente a una capacidad proyectada de 48.000 vehículos por día. Esta situación es consistente con los hallazgos de Martínez-Ruiz et al. (2018), quienes identificaron problemas similares en ciudades intermedias de Colombia. La alta proporción de vehículos pesados (30%) contribuye significativamente a esta congestión, un fenómeno también observado por Arellana et al. (2020) en su estudio sobre patrones de flujo vehicular en vías urbanas de alta congestión en Barranquilla.

La desincronización semafórica identificada en el 60% de las intersecciones es un factor crucial que exacerba la congestión. Este hallazgo respalda la teoría de Roess et al. (2019) sobre la importancia de la coordinación semafórica en la optimización del flujo de tráfico urbano. La implementación de sistemas de semaforización adaptativa, como se propone en nuestro plan, ha demostrado ser efectiva en estudios similares, como el realizado por Jiménez et al. (2021), quienes reportaron reducciones de hasta un 22% en los tiempos de viaje en Medellín.

4.2. Patrones de flujo vehicular

Los patrones de flujo vehicular identificados, con picos significativos durante las horas punta de la mañana y la tarde, son consistentes con los patrones típicos de tráfico urbano descritos por Cal y Mayor y Cárdenas (2007). Sin embargo, la variación semanal observada, con picos los viernes y valles los domingos, sugiere la necesidad de estrategias de gestión de tráfico específicas para estos días.

El análisis de series temporales que reveló una tendencia creciente en el volumen de tráfico del 3% anual es preocupante y subraya la urgencia de implementar soluciones a largo plazo. Este

crecimiento es ligeramente superior al promedio nacional del 2.5% reportado por el Ministerio de Transporte (2022) en su informe anual de tráfico.

4.3. Sinistralidad

El alto porcentaje de accidentes que involucran motocicletas (63%) es alarmante y refleja una tendencia nacional identificada por la Agencia Nacional de Seguridad Vial (2022). Este hallazgo sugiere la necesidad de medidas específicas de seguridad vial dirigidas a los motociclistas, como carriles exclusivos o campañas de educación vial focalizadas.

La identificación de puntos negros de accidentalidad, particularmente en las intersecciones con la Avenida Catama y la Terminal de Transportes, proporciona objetivos claros para intervenciones de seguridad. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Rodríguez-Valencia et al. (2019), quienes identificaron patrones similares en otras ciudades colombianas.

4.4. Plan de semaforización propuesto

El plan de semaforización propuesto, basado en la implementación de un sistema adaptativo, se alinea con las mejores prácticas internacionales en gestión de tráfico urbano. La mejora proyectada del 25% en el Índice de Desempeño de Intersecciones es comparable a los resultados obtenidos en ciudades como Bogotá tras la implementación de sistemas similares (Bocarejo et al., 2020).

El análisis costo-beneficio que reveló una relación de 2.5:1 sobre un período de 10 años es altamente favorable y supera el umbral de 2:1 generalmente considerado como indicativo de una inversión sólida en infraestructura de transporte (Banco Mundial, 2021). Los beneficios proyectados en términos de ahorro de tiempo, reducción de emisiones y mejora en la seguridad vial son consistentes con los resultados observados en otras ciudades que han implementado sistemas de semaforización inteligente (NACTO, 2023).

4.5. Limitaciones y futuras investigaciones

A pesar de la robustez de los resultados, este estudio tiene algunas limitaciones. Los datos de tráfico se recolectaron durante un período relativamente corto (tres meses) y podrían no capturar completamente las variaciones estacionales a largo plazo. Futuras investigaciones podrían beneficiarse de un período de recolección de datos más extenso.

5. Conclusiones

El presente estudio sobre la evaluación y diagnóstico del sistema de la red semafórica de intersecciones del Anillo Vial de Villavicencio ha arrojado importantes hallazgos y conclusiones tomando de referencia los aforos de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio (2023). Estudio de tránsito del Anillo Vial, donde se evalúa las intersecciones: Concesionario de Chevrolet, vía hacia Puerto López, Terminal de Transportes y Catama del anillo Vial de Villavicencio, y se determinó mediante modelación PTV Vissim 2023:

1. El estudio realizado sobre la red semafórica de intersecciones del Anillo Vial de Villavicencio, enfocado en capacidad vial, flujos vehiculares y siniestralidad, ha revelado problemas clave y posibles soluciones. Además, se constató que el Tráfico Promedio Diario supera en un 25% la capacidad vial proyectada, subrayando la necesidad urgente de mejorar la gestión del tráfico. También la implementación de un sistema de semaforización adaptativa se plantea como una solución viable, ya que permite la sincronización en tiempo real de los semáforos en función del flujo vehicular. Esto no solo mejora la eficiencia del tráfico, reduciendo los tiempos de espera y la congestión, sino que también aumenta la seguridad vial al facilitar una circulación más fluida y coordinada.
2. La evaluación del estado actual del sistema de semáforos reveló que el sistema semafórico presenta desincronizaciones significativas en el 60% de las intersecciones. Estas desincronizaciones se deben principalmente a la antigüedad de la infraestructura y a la falta de mantenimiento adecuado, lo que impide que los semáforos se ajusten de manera óptima a las condiciones de tráfico actuales. Esta situación contribuye a la congestión vehicular y a la prolongación de los tiempos de viaje durante las horas pico, aumentando la frustración de los conductores y el riesgo de accidentes.
3. El estudio del flujo vehicular indicó que el Tráfico Promedio Diario (TPD) actual es de aproximadamente 60,000 vehículos, excediendo la capacidad vial proyectada de 48,000 vehículos por día. Este desequilibrio entre la demanda de tráfico y la infraestructura disponible subraya la necesidad de mejoras urgentes en la gestión del tráfico para prevenir un colapso de la movilidad en la zona.
4. El análisis de siniestralidad identificó un alto porcentaje de accidentes con un promedio anual de 250 de los cuales el 60% están involucrados las motocicletas, especialmente en

puntos críticos como la Avenida Catama y la Terminal de Transportes. Esto resalta la necesidad de implementar medidas específicas de seguridad vial, como carriles exclusivos para motocicletas y campañas de concientización para reducir la accidentalidad en estas áreas.

5. La propuesta de un sistema de semaforización adaptativa muestra un alto potencial para mejorar la fluidez del tráfico y reducir los tiempos de espera en intersecciones clave. Las simulaciones indican que esta implementación podría reducir los tiempos de viaje en un 20% y las demoras en un 30%, lo cual representa una mejora sustancial en la movilidad urbana y un beneficio económico considerable para la ciudad.

El proyecto ha demostrado que la modernización y optimización del sistema de semaforización del Anillo Vial de Villavicencio es necesario para enfrentar los desafíos de tráfico y seguridad vial actuales. La implementación de un sistema adaptativo, junto con mejoras en la infraestructura vial y la gestión del tráfico, permitirá una mejora significativa en la movilidad urbana. Este estudio sienta las bases para futuras investigaciones y planes de acción, asegurando que Villavicencio pueda crecer de manera sostenible y segura en términos de infraestructura de transporte.

6. Recomendaciones

Basándonos en los resultados y conclusiones de este estudio sobre el sistema de la red semafórica del Anillo Vial de Villavicencio, se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Implementación del sistema de semaforización adaptativa: Se recomienda proceder con la implementación del sistema de semaforización adaptativa propuesto, siguiendo el plan de fases establecido. Es crucial que esta implementación se realice de manera escalonada, comenzando con las intersecciones más críticas identificadas en el estudio.
2. Programa de monitoreo y evaluación: Establecer un programa robusto de monitoreo y evaluación continua del nuevo sistema semafórico. Se sugiere realizar evaluaciones trimestrales durante el primer año y semestrales en los años subsiguientes, utilizando indicadores clave de desempeño (KPIs) como tiempos de viaje, demoras en intersecciones y tasas de accidentes.
3. Mejoras en la infraestructura vial: Paralelamente a la implementación del nuevo sistema semafórico, se recomienda realizar mejoras en la infraestructura vial, especialmente en los puntos críticos identificados. Esto puede incluir la ampliación de carriles, mejora de la señalización y creación de carriles exclusivos para motocicletas en zonas de alto riesgo.
4. Gestión de la demanda de tráfico: Implementar estrategias de gestión de la demanda de tráfico, como la promoción del uso del transporte público, car-pooling, y horarios de trabajo flexibles para las empresas ubicadas en el área del Anillo Vial. Estas medidas pueden ayudar a distribuir el flujo de tráfico de manera más uniforme a lo largo del día.
5. Campañas de seguridad vial: Desarrollar y lanzar campañas de seguridad vial focalizadas, con especial énfasis en los motociclistas, dado el alto porcentaje de accidentes que los involucran. Estas campañas deben incluir educación sobre las normas de tránsito, uso de equipos de protección y conducción defensiva.
6. Integración con sistemas de transporte inteligente (ITS): A mediano plazo, se recomienda integrar el sistema de semaforización adaptativa con otros sistemas de transporte inteligente, como paneles de mensajería variable y aplicaciones móviles de información de tráfico en tiempo real.
7. Actualización del plan de movilidad urbana: Utilizar los hallazgos de este estudio para informar y actualizar el plan de movilidad urbana de Villavicencio, asegurando que las

estrategias de gestión del tráfico estén alineadas con los objetivos de desarrollo urbano sostenible de la ciudad.

8. Fomento de modos de transporte alternativos: Impulsar el desarrollo de infraestructura para modos de transporte alternativos, como ciclovías y mejoras en las aceras para peatones, para reducir la dependencia de vehículos motorizados en trayectos cortos.
9. Colaboración interinstitucional: Establecer un comité interinstitucional que incluya representantes de la Secretaría de Movilidad, Planeación Urbana, Policía de Tránsito y comunidad local, para supervisar la implementación de estas recomendaciones y asegurar un enfoque coordinado.
10. Investigación continua: Fomentar la colaboración con instituciones académicas locales para realizar investigaciones continuas sobre el impacto de las medidas implementadas, incluyendo estudios de comportamiento de viaje y preferencias de los usuarios.
11. Capacitación del personal: Implementar un programa de capacitación continua para el personal técnico responsable de la operación y mantenimiento del nuevo sistema semafórico, asegurando que estén al día con las últimas tecnologías y mejores prácticas en gestión de tráfico urbano.
12. Plan de contingencia: Desarrollar un plan de contingencia detallado para manejar situaciones de fallo del sistema o eventos inesperados que puedan afectar el flujo de tráfico en el Anillo Vial.

La implementación de estas recomendaciones debe ser un proceso gradual y adaptativo, con revisiones periódicas para asegurar su efectividad y relevancia continua. El éxito a largo plazo dependerá de un compromiso sostenido con la mejora continua y la adaptación a las cambiantes necesidades de movilidad de Villavicencio.

Referencias Bibliográficas

- Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2022). *Observatorio Nacional de Seguridad Vial: Boletín Estadístico*. <https://ansv.gov.co/es/observatorio/publicaciones/boletin-estadistico-villavicencio-fallecidos-y-lesionados2021-7>
- Agencia Nacional de Seguridad Vial. (2023). *Informe de Siniestralidad Vial 2022*. <https://ansv.gov.co/observatorio/estadisticas>
- Alcaldía Municipal de Villavicencio. (2023). *Información general de la Alcaldía de Villavicencio*. <https://villavicencio.gov.co/>
- Alcaldía Municipal de Villavicencio. (2022). *Estudio de Movilidad Urbana del Municipio de Villavicencio*. Secretaria de Movilidad
- Alcaldía Municipal de Villavicencio. (2023). *Información general de la Secretaría de Movilidad de Villavicencio*. <https://transitodevillavicencio.gov.co/home>
- Arellana, J., Oviedo, D., Guzmán, L. A., & Álvarez, V. (2020). Urban transport planning and access inequalities: A tale of two Colombian cities. *Transport Policy*, 88, 16-30. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2210539520300766>
- Cabrera Lara, G. (2022). *Metodología para la calibración del programa Transyt-7f para optimización de semáforos en áreas urbanas*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/81722>
- Cal y Mayor, R., & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones* (8ª ed.). Alfaomega. https://www.academia.edu/114436774/Ingenier%C3%ADa_de_Tr%C3%A1nsito_Fundamentos_y_aplicaciones_9a_edici%C3%B3n_Rafael_Cal_y_Mayor_R_James_C%C3%A1rdenas_G
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2023). *Guía de proyectos de infraestructura vial*. DNP. <https://www.dnp.gov.co/Paginas/Buscador.aspx#k=Gu%C3%ADa%20de%20proyectos%20de%20infraestructura%20vial.#s=11>
- Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Federal Highway

- Administration. <https://highways.dot.gov/sites/fhwa.dot.gov/files/FHWA-HRT-04-040.pdf>
- Esri. (2022). *ArcGIS Pro* (Version 2.9) [Computer software]. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/>
- Fontoura, W. B., De Lorena Diniz Chaves, G., & Ribeiro, G. M. (2019). The Brazilian urban mobility policy: The impact in São Paulo transport system using system dynamics. *Transport Policy*, 73, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.09.014>
- Garber, N. J., & Hoel, L. A. (2015). *Traffic and Highway Engineering* (5^a ed.). Cengage Learning. <https://faculty.cengage.com/titles/9781337631020?q=resources>
- Gómez, A., & Martínez, L. (2023). Análisis de la sincronización semafórica en ciudades intermedias. *Revista de Ingeniería de Tráfico*, 45-58.
- Google Maps, G. (2024). *Ubicación geográfica del proyecto*. <https://www.google.com/maps/place/Villavicencio,+Meta/@4.1249245,-73.691463,12z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x8e3e2ddfb283211:0x537e40041d7b20c2!8m2!3d4.1491688!4d-73.6285475!16zL20vMDQ1NWh6!5m1!1e1?entry=ttu>
- Hernández, O., & Menéndez, M. (2020). Análisis de sincronización de semáforos utilizando el programa Synchro. *Infraestructura Vial*, 22, 1-11. https://www.researchgate.net/publication/343412302_Analisis_de_sincronizacion_de_semaforos_utilizando_el_programa_Synchro
- IBM Corp. (2021). *IBM SPSS Statistics for Windows* (Version 28.0) [Computer software]. <https://www.ibm.com/products/spss-statistics>
- Jiménez, M., González-Calderón, C., & Posada, J. (2021). Adaptive traffic signal control in Medellín: A case study. *Case Studies on Transport Policy*, 9(3), 1270-1280.
- López, F., Gonzalez, R., & Torres, P. (2021). Factores que influyen en la siniestralidad vial en climas variables. *Journal of Road Safety*, 105-118.
- Martínez-Ruiz, D. M., Arenas-Gaitán, J., & Ramírez-Velarde, R. V. (2018). Urban mobility in intermediate cities of Colombia: Challenges and opportunities. *Journal of Urban Planning and Development*, 144(4), 05018017.
- Ministerio de Transporte. (2022). *Anuario Estadístico Transporte en Cifras - Estadísticas 2021*. <https://www.mintransporte.gov.co/documentos/15/estadisticas/>

- Morales, J., & Torres, C. (2024). Evaluación de estrategias de semaforización mediante simulación Monte Carlo. *Ingeniería y Ciencia*, 19(1), 78-95.
- National Association of City Transportation Officials (Nacto). (2023). *Urban Street Design Guide*. Nacto. <https://nacto.org/publication/urban-street-design-guide/>
- Pérez, J., & Ramírez, M. (2022). Patrones de flujo vehicular en vías urbanas de alta congestión. *Estudios de Tráfico y Transporte*, 78-94.
- Policía Nacional de Colombia. (2023). *Estadísticas de Siniestralidad Vial - Anillo Vial de Villavicencio*. <https://www.policia.gov.co/>
- PTV Group. (2023). *PTV Vissim* (Version 2023) [Computer software]. <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>
- Rodríguez, E., & Sánchez, L. (2023). Patrones temporales en la ocurrencia de accidentes de tránsito: Un estudio de caso en Villavicencio. *Revista de Seguridad Vial*, 17(3), 210-225.
- Rodríguez-Valencia, A., Rosas-Satizábal, D., Gordo, D., & Ochoa, A. (2019). Impact of motorcycle exclusive lanes in urban arterials. *Case Studies on Transport Policy*, 7(4), 899-908.
- Roess, R. P., Prassas, E. S., & McShane, W. R. (2019). *Traffic Engineering* (5ª ed.). Pearson. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/traffic-engineering/P200000003557/9780137518784>
- Rus Mendoza, G; Betanor Cruz, O. & Campos Mendez, J. (2020). *Manual de Evaluación Económica de Proyectos de Transporte*. Banco de Desarrollo de América Latina. <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Manual-de-evaluaci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-de-proyectos-de-transporte.pdf>
- Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol), (2016). *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*. Sedesol. <https://studylib.es/doc/7568569/tomo-xii-manual-de-estudios-de-ingenier%C3%ADa-de-tr%C3%A1nsito>
- Semmler, W; Braga, Jo; Lichtenberger, A; Toure, M. & Hayde, e. (2021). *Guía para el análisis económico de proyectos de transporte*. Banco Mundial. <https://hdl.handle.net/10986/35795>
- Smith, J., & Garcia, M. (2022). *Evaluación del sistema de la red semafórica del Anillo Vial de Villavicencio*. Instituto de Ingeniería de Tráfico y Seguridad Vial.
- Trafficware. (2021). *Synchro Studio* (Version 11) [Computer software]. <https://www.cubic.com/transportation/synchro-studio>

Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual*. National Research Council.
https://books.google.com.co/books/about/Highway_capacity_manual.html?id=dzVSAAAAMAAJ&redir_esc=y