

OPTIMIZACIÓN DE INTERSECCIONES CONFLICTIVAS DEL FLUJO VEHICULAR EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA

OPTIMIZATION OF CONFLICTIVE INTERSECTIONS OF VEHICLE FLOW IN THE CITY CENTER OF RIOBAMBA

Michael Adrián Erazo Granizo¹, Alfredo Rodrigo Colcha Ortiz²

{michael.erazo@unach.edu.ec¹, alfredo.colcha@unach.edu.ec²}

Fecha de recepción: 20/12/2024 / Fecha de aceptación: 04/01/2025 / Fecha de publicación: 06/01/2025

RESUMEN: El artículo aborda uno de los mayores desafíos en la movilidad urbana como la congestión en intersecciones estratégicas, a través de una metodología cuantitativa y descriptiva, se recolectaron y analizaron más de 40,000 datos de tráfico en tiempo real utilizando herramientas tecnológicas para simular sensores como Survey123 y QuickCapture, integradas con ArcGIS. Estos datos incluyen variables como tipo de vehículo, movimientos realizados y coordenadas geográficas, los análisis permitieron identificar las intersecciones más conflictivas, como G17A001 y G47A002, que presentaron los mayores tiempos de espera y niveles críticos de congestión vehicular. La investigación implementó modelos de optimización lineales y no lineales para redistribuir los tiempos semafóricos y equilibrar los flujos vehiculares, logrando reducciones de hasta un 30% en los tiempos de espera. Además, el uso de herramientas como ArcGIS permitió visualizar patrones de congestión y generar mapas interactivos que facilitaron la toma de decisiones, los resultados no solo optimizan la movilidad urbana, sino que también contribuyen a minimizar impactos ambientales y sentar las bases para políticas públicas enfocadas en infraestructura vial sostenible. El estudio subraya la importancia de integrar tecnologías avanzadas y modelos matemáticos para abordar problemas complejos de tránsito, posicionando a la ciudad de Riobamba como referente en la gestión eficiente del tráfico urbano.

Palabras clave: *Movilidad urbana, tecnologías geoespaciales, intersecciones conflictivas, modelos de optimización, congestión vehicular, pttimización del tráfico*

ABSTRACT: The article addresses one of the biggest challenges in urban mobility such as congestion at strategic intersections, through a quantitative and descriptive methodology, more than 40,000 traffic data were collected and analyzed in real time using technological tools to simulate sensors such as Survey123 and QuickCapture, integrated with ArcGIS. These data include variables such as type of vehicle, movements made and geographical coordinates. The

¹Maestrante, Maestría en Matemática Aplicada con mención en Matemática Computacional en Posgrado, Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH). Riobamba-Ecuador. <https://orcid.org/0000-0003-0247-1394>.

²Docente Investigador de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH). Riobamba-Ecuador. <https://orcid.org/0009-0005-2280-5189>.

analyses allowed us to identify the most conflictive intersections, such as G17A001 and G47A002, which presented the longest waiting times and critical levels of vehicle congestion.

The research implemented linear and non-linear optimization models to redistribute traffic light times and balance vehicle flows, achieving reductions of up to 30% in waiting times. In addition, the use of tools such as ArcGIS made it possible to visualize congestion patterns and generate interactive maps that facilitated decision-making. The results not only optimize urban mobility, but also contribute to minimizing environmental impacts and laying the foundations for public policies focused on sustainable road infrastructure. The study highlights the importance of integrating advanced technologies and mathematical models to address complex traffic problems, positioning the city of Riobamba as a reference in the efficient management of urban traffic.

Keywords: *Urban mobility, geospatial technologies, conflictive intersections, optimization models, vehicle congestion, traffic optimization*

INTRODUCCIÓN

La optimización de intersecciones vehiculares conflictivas en áreas urbanas es un desafío prioritario para garantizar la movilidad eficiente, la seguridad vial y la sostenibilidad ambiental, en la ciudad de Riobamba - Ecuador, el incremento constante del parque automotor ha generado congestión en puntos estratégicos del centro urbano, afectando tanto la calidad de vida de los ciudadanos como la productividad económica de la región, las intersecciones conflictivas son aquellas donde los flujos vehiculares presentan mayores niveles de congestión, tiempos de espera prolongados y un aumento en el riesgo de accidentes de tránsito. Este artículo se centra en el análisis y la optimización de las intersecciones conflictivas en el centro de Riobamba, utilizando herramientas estadísticas, modelos de optimización y tecnologías geoespaciales.

Es importante optimizar las intersecciones urbanas debido a su impacto directo en la eficiencia del tránsito, la reducción de tiempos de espera y la mitigación de la congestión vehicular, problemas comunes en áreas urbanas densamente pobladas, las intersecciones representan puntos críticos en las redes viales, donde los flujos vehiculares convergen y, sin una adecuada sincronización, pueden generar cuellos de botella que afectan la movilidad y aumentan las emisiones contaminantes. Existen varios modelos y metodologías propuestas para evaluar las intersecciones, como el modelo de autómatas celulares, que destaca por su simplicidad computacional y su adaptabilidad a diversas configuraciones de flujo vehicular, proporcionando resultados precisos en tiempo razonable, es un enfoque que responde a la necesidad de herramientas versátiles y eficientes para abordar problemas complejos de tránsito (1).

Una intersección se considera conflictiva cuando el flujo vehicular genera puntos de congestión, largos tiempos de espera, o riesgos elevados de colisión debido a la convergencia de múltiples trayectorias. Factores como el diseño geométrico, la sincronización inadecuada de los semáforos y el volumen vehicular excesivo contribuyen significativamente a la problemática de estas intersecciones en las ciudades.

Además, la presencia o ausencia de semáforos influye directamente en el orden del tráfico y la percepción de seguridad, los semáforos mal sincronizados o insuficientes incrementan el riesgo de colisiones y congestionan el flujo vehicular, mientras que los giros, especialmente los giros a la izquierda complican aún más el diseño eficiente de estas áreas, es necesario abordar los problemas estructurales y operativos que agravan las condiciones de tráfico (2).

La adopción de nuevas tecnologías, como sensores de tráfico, es esencial para que las ciudades modernas enfrenten problemas críticos relacionados con el transporte, como la congestión, la seguridad vial, la contaminación ambiental y sus efectos en la salud. Estas herramientas permiten a las administraciones públicas recopilar datos en tiempo real y conservar registros históricos, ofreciendo una base sólida para el análisis y la toma de decisiones. Los sensores, junto con tecnologías avanzadas de modelado y predicción, facilitan la comprensión de los patrones de tráfico y su impacto en la calidad del aire, existen proyectos que utilizan sensores de bajo costo y técnicas de modelado para proporcionar predicciones en tiempo real sobre la calidad del aire y el tráfico, integrando datos históricos para una planificación urbana más informada. Además, el uso de datos abiertos y aplicaciones digitales fomenta la transparencia y la participación de la ciudadanía en la discusión sobre el futuro de las ciudades (3).

Las redes de sensores representan una tecnología en constante evolución gracias a su capacidad de adaptarse a un amplio rango de aplicaciones prácticas, incluyendo la gestión del tráfico vehicular en áreas urbanas. Su facilidad de implementación y configuración, combinada con la flexibilidad inherente de esta tecnología, las convierte en una herramienta ideal para aplicaciones en tiempo real que requieren la recopilación de datos en espacios geográficamente amplios.

Para nuestro estudio estas redes ofrecen una solución eficiente para monitorear y analizar el flujo vehicular, proporcionando datos precisos y actualizados que permiten identificar patrones, evaluar la eficiencia de las intersecciones y proponer soluciones fundamentadas. Además, las redes de sensores no solo capturan información en tiempo real, sino que también almacenan datos históricos, esenciales para realizar análisis comparativos y evaluar la efectividad de las medidas implementadas a lo largo del tiempo (4).

Es importante delimitar zonas de congestión dentro de las zonas urbanas, en el caso de nuestro estudio el centro de la ciudad, utilizando datos masivos y de alta resolución espacial, que permita identificar las rutas y nodos más afectados en el tema de tráfico vehicular, permitiendo un análisis más detallado y contextualizado. En el artículo "Delineating Traffic Congestion Zones in Cities: An Effective Approach Based on GIS" aborda la identificación de zonas de congestión vehicular utilizando un enfoque espacial apoyado en Sistemas de Información Geográfica (SIG). La metodología desarrollada se aplicó en cuatro ciudades asiáticas, incluyendo Bangkok y Hong Kong, validando las zonas congestionadas con datos de velocidad de tráfico. El estudio también evaluó la eficacia de esta metodología frente a un enfoque basado en densidad laboral, concluyendo que el método espacial es eficiente y replicable en diversas ciudades (5).

Es importante identificar puntos críticos urbanos, como en el artículo "Urban hotspots detection of taxi stops with local maximum density" que evalúa hotspots, mediante un enfoque de densidad máxima local (LMD) aplicado a datos de taxis en Wuhan, China, estos hotspots representan áreas

específicas donde las actividades de recogida y bajada de pasajeros son más frecuentes, como intersecciones, centros comerciales o áreas residenciales.

El método LMD utiliza datos espaciales y temporales para detectar puntos críticos en una escala pequeña, ajustándose mejor a la percepción humana del espacio, este enfoque permite analizar tanto zonas populares como menos populares, destacando patrones no uniformes entre las áreas de recogida y bajada. La metodología presentada en el artículo proporciona una herramienta útil para analizar dinámicas urbanas complejas y mejorar la toma de decisiones en la gestión del tráfico, siendo directamente relevante para investigaciones como la optimización de intersecciones en el centro de la ciudad de Riobamba utilizando Sistemas de Información Geográfica SIG (6).

El uso de modelos de optimización lineales y no lineales, junto con la simulación, es esencial para abordar los complejos desafíos que enfrentan las ciudades en la gestión del tráfico urbano, según el artículo, la metodología de "Optimización vía Simulación" (OvS) demuestra ser una herramienta poderosa para integrar dinámicas no lineales, múltiples objetivos y condiciones estocásticas en problemas como la redistribución de carriles, la sincronización de semáforos y el diseño de redes de transporte, combinando algoritmos de simulación y metaheurísticas avanzadas, como Kriging, para reducir los tiempos computacionales, permitiendo aplicaciones a gran escala en entornos urbanos. Además, resalta la capacidad de estos modelos para optimizar la distribución del tráfico y mejorar la eficiencia de las intersecciones conflictivas (7).

El objetivo de la investigación es proponer soluciones basadas en simulaciones y un modelo de optimización, que permitan reducir los tiempos de espera y mejorar la fluidez del tránsito en las intersecciones más críticas, este enfoque no solo contribuirá a optimizar la movilidad urbana, sino que también apoyará la planificación sostenible de la ciudad, minimizando los impactos ambientales asociados al tráfico vehicular. Además, generará insumos útiles para la toma de decisiones por parte de las autoridades locales, aportando una base técnica sólida para la implementación de políticas públicas orientadas a mejorar la infraestructura vial y la gestión del tráfico en áreas urbanas (8).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio tiene un enfoque cuantitativo y descriptivo, se llevó a cabo en el centro de la ciudad de Riobamba, una zona caracterizada por intersecciones con altos niveles de congestión vehicular es cuantitativo debido a la necesidad de recopilar, analizar y cuantificar datos específicos relacionados con el flujo vehicular en intersecciones críticas, permitiendo identificar patrones y proponer soluciones basadas en evidencia numérica. Además, el carácter descriptivo del estudio se justifica en la intención de detallar las características de las intersecciones conflictivas, como la distribución de tipos de vehículos, los movimientos realizados y los tiempos de espera, proporcionando una visión clara del comportamiento del tráfico en esta área urbana.

Se empleó técnicas avanzadas de recolección, procesamiento y análisis de datos, utilizando instrumentos tecnológicos que garantizan precisión y eficiencia, la recolección de datos en campo se realizó mediante aplicaciones móviles como Survey123 y Quick Capture, integradas con el

sistema ArcGIS, las herramientas permitieron registrar datos en tiempo real, como tipo de vehículo, movimientos (recto, giros a la derecha o izquierda), y coordenadas geográficas de cada intersección, las aplicaciones aseguraron que la información capturada fuera georreferenciada y de alta calidad, fundamental para el análisis posterior.

Para el procesamiento de datos se utilizó Python junto con bibliotecas especializadas, como Pandas y Matplotlib, para realizar análisis exploratorios de los datos. Además, el software ArcGIS Pro fue crucial para estructurar y visualizar los datos, generando mapas temáticos y capas de información que facilitaron la identificación de las intersecciones más conflictivas.

La muestra del estudio se compone de 40,442 registros recolectados en tiempo real de intersecciones críticas del centro de Riobamba, los datos incluyen variables como tipo de vehículo, movimientos (rectos y giros) y coordenadas geográficas, la selección de intersecciones prioritarias asegura que los resultados sean representativos de las condiciones de tráfico en la zona urbana estudiada.

RESULTADOS

El incremento en el número de vehículos en la ciudad de Riobamba ha sido notable en los últimos años, lo que ha intensificado los problemas de tráfico y generando congestionamientos en varias de sus intersecciones. Para abordar estas dificultades y promover tanto la movilidad urbana como la seguridad vial, la Universidad Nacional de Chimborazo, a través de su programa semestral de investigación formativa en la carrera de Ingeniería Civil, ha desarrollado el proyecto interdisciplinario denominado "Modelo Predictivo para Intersecciones Conflictivas en la Ciudad de Riobamba". Este proyecto busca enfrentar el desafío mediante el empleo de técnicas avanzadas de análisis y modelado predictivo, combinando conocimientos en Ingeniería, Sistemas de Información Geográfica (SIG), Tránsito y Transporte; y Métodos Numéricos (9).

Para este trabajo de investigación se ha considerado la zona centro de la ciudad de Riobamba las cuales las cuales son de alto tráfico vehicular.

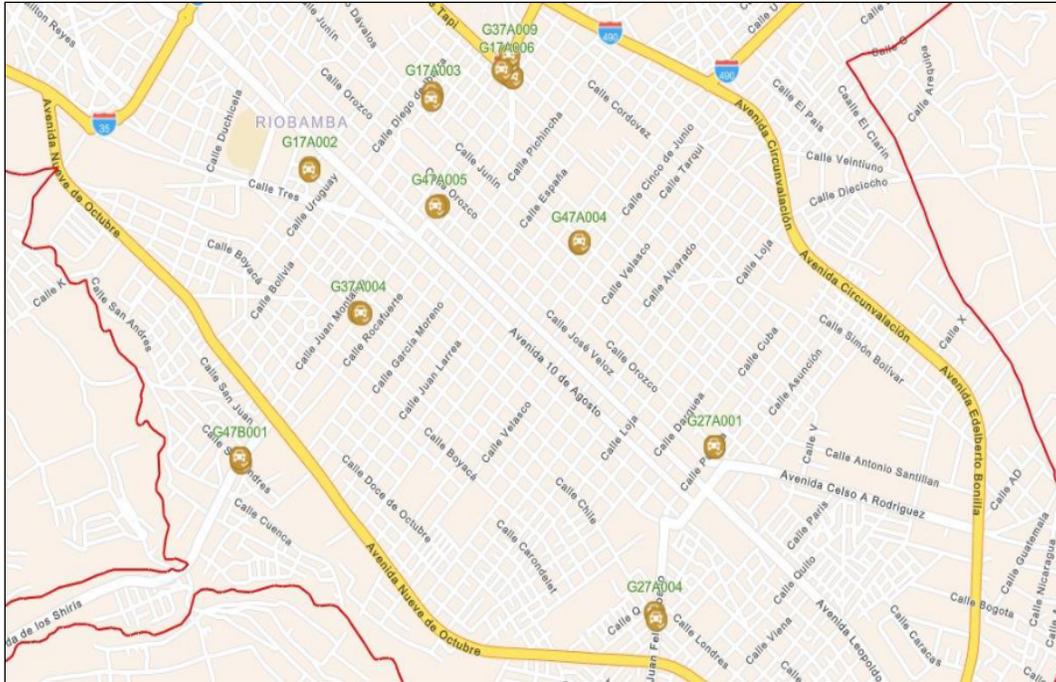


Figura 1. Centro de la ciudad de Riobamba.

Los datos han sido recolectados por los estudiantes de la institución, mediante el uso de nuevas tecnologías y a través de la simulación de sensores, generando un total de 40442 datos validos que entre las características principales se encuentran la Intersección, Fecha y hora, Tipo de vehículo, Movimiento y la geolocalización con su coordenada X e Y (10).

	Interseccion	Fecha	Tipo_Vehiculo	Movimiento	x	y
0	G27A001	2024-07-22 11:31:36	Automóvil	Derecha	-78.640859	-1.677856
1	G27A001	2024-07-22 11:31:11	Automóvil	Recto	-78.640846	-1.677839
2	G27A001	2024-07-22 11:31:41	Automóvil	Derecha	-78.640894	-1.677873
3	G27A001	2024-07-22 11:32:34	Camioneta	Recto	-78.640910	-1.677896
4	G27A001	2024-07-22 11:32:33	Automóvil	Recto	-78.640910	-1.677896
...
40437	G47A002	2024-07-28 12:52:02	Automóvil	Derecha	-78.644583	-1.654046
40438	G47A002	2024-07-28 12:52:43	Camioneta	Recto	-78.644575	-1.653961
40439	G47A002	2024-07-28 12:52:24	Camioneta	Derecha	-78.644580	-1.654031
40440	G47A002	2024-07-28 12:52:23	Automóvil	Recto	-78.644580	-1.654031
40441	G37A001	2024-07-27 17:00:23	Automóvil	Recto	-78.637722	-1.656781

40442 rows x 6 columns

Figura 2. Datos recolectados cargados en el IDE.

Se debe tener en cuenta que el propósito primario de esta recolección de datos es el simular la existencia de sensores, mismos que no existen en el centro de Riobamba, esto se realizó con la intervención de estudiantes en las esquinas con el uso de aplicaciones en sus celulares: Mi Survey123 y Quick Capture.

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante el uso de Mi Survey123, una aplicación diseñada específicamente para este tipo de proyectos y conectada a ArcGIS mediante su API. Esta integración permitió aprovechar tecnologías geoespaciales avanzadas, facilitando la captura precisa de coordenadas geográficas y la ubicación de intersecciones en un mapa (11).

Mi Survey123 se utilizó para registrar información clave de cada esquina, incluyendo un código único de identificación, la clasificación del sector (urbano o rural), la parroquia correspondiente, y la dirección exacta. Además, se evaluó la presencia o ausencia de señalética vertical y horizontal, datos esenciales para analizar las condiciones de infraestructura vial y su impacto en el flujo vehicular (12).

La aplicación garantizó un proceso ágil y organizado, proporcionando datos consistentes y precisos. Su integración con ArcGIS permitió visualizar los datos en mapas interactivos, identificando patrones y áreas conflictivas para el análisis y la toma de decisiones.



Figura 3. Interfaz principal de la aplicación.

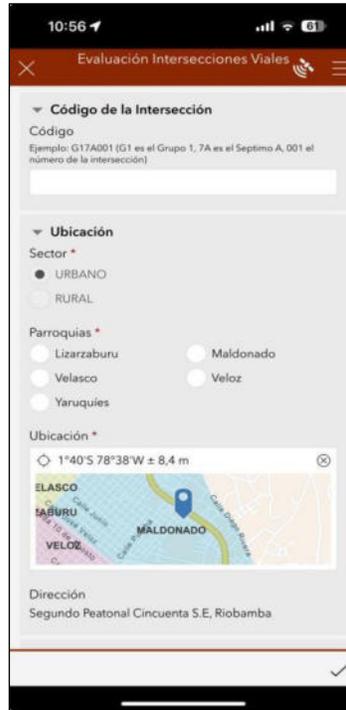


Figura 4. Interfaz del usuario para el ingreso de los datos.

En resumen, Mi Survey123 combinó la flexibilidad de una aplicación personalizada con las capacidades de ArcGIS, estableciendo una base confiable para analizar y optimizar el flujo vehicular en intersecciones, además de servir como herramienta clave para el diseño de soluciones efectivas en movilidad urbana (13).

Una vez ingresados los datos viene el uso de la segunda aplicación, Quick Capture, así mismo consume la API de parte de ArcGIS. Gracias a su diseño intuitivo y su capacidad para registrar datos con rapidez, fue posible capturar información detallada en tiempo real sobre cada vehículo que transitaba por el lugar. Los datos recolectados incluyeron el tipo de vehículo, como automóviles, camionetas, camiones, entre otros, lo que permitió una clasificación precisa del tráfico. Además, se registraron los movimientos de los vehículos, especificando si seguían recto, giraban a la derecha o a la izquierda.

La interfaz simplificada de QuickCapture permitió a los equipos de campo trabajar de manera eficiente, recopilando grandes volúmenes de información. Cada registro quedó automáticamente georreferenciado, garantizando la precisión de la ubicación y facilitando la integración directa con ArcGIS para el análisis posterior. Esta funcionalidad fue clave para identificar patrones de tráfico y establecer las bases del modelo de optimización, asegurando que las decisiones se tomaran sobre datos confiables y actualizados (14).



Figura 5. Tipos de vehículos considerados para el estudio.



Figura 6. Registro de movimientos de los vehículos.

En este proyecto, QuickCapture y Survey123 se integraron de manera estratégica para abordar diferentes necesidades de recolección de datos y garantizar un análisis integral. Facilitaron la captura rápida de datos dinámicos del flujo vehicular, como el tipo de vehículo y su movimiento, además de permitir registrar información más detallada y estructurada sobre las características físicas y geográficas de las intersecciones, como coordenadas, sector, parroquia, y señalización vial. Ambos sistemas trabajaron de forma sincronizada con ArcGIS, donde los datos recolectados se visualizaron en mapas interactivos. Esta integración no solo proporcionó una representación geoespacial precisa, sino que también permitió identificar patrones y áreas problemáticas, generando una categorización acertada de los datos (15).

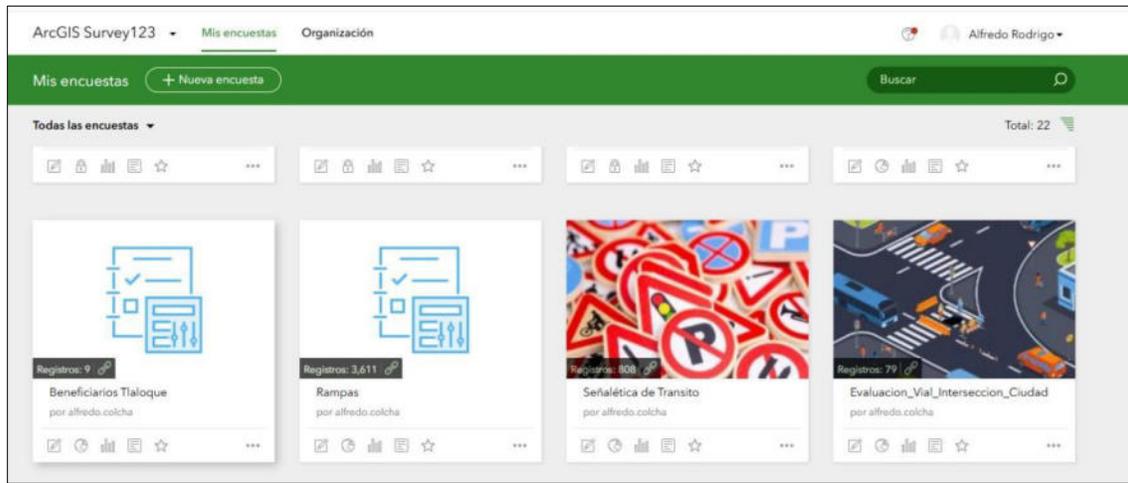


Figura 7. Interfaz web de ArcGIS.

Una vez definidos los datos, se puede iniciar un Análisis Exploratorio de Datos (EDA) que permite comprender la estructura y características fundamentales del conjunto de datos recopilados. Este análisis tiene como objetivo identificar patrones, tendencias y posibles anomalías en la información relacionada con el flujo vehicular en las intersecciones del centro de Riobamba (16).

A través del uso de herramientas como pandas, matplotlib y seaborn, se analizan variables clave como el tipo de vehículo, los movimientos realizados (recto, giro a la derecha o a la izquierda) y el flujo total en cada intersección. Los resultados de este EDA no solo proporcionan una visión inicial de los datos, sino que también permiten sentar las bases para la identificación de intersecciones conflictivas y el desarrollo de estrategias de optimización.

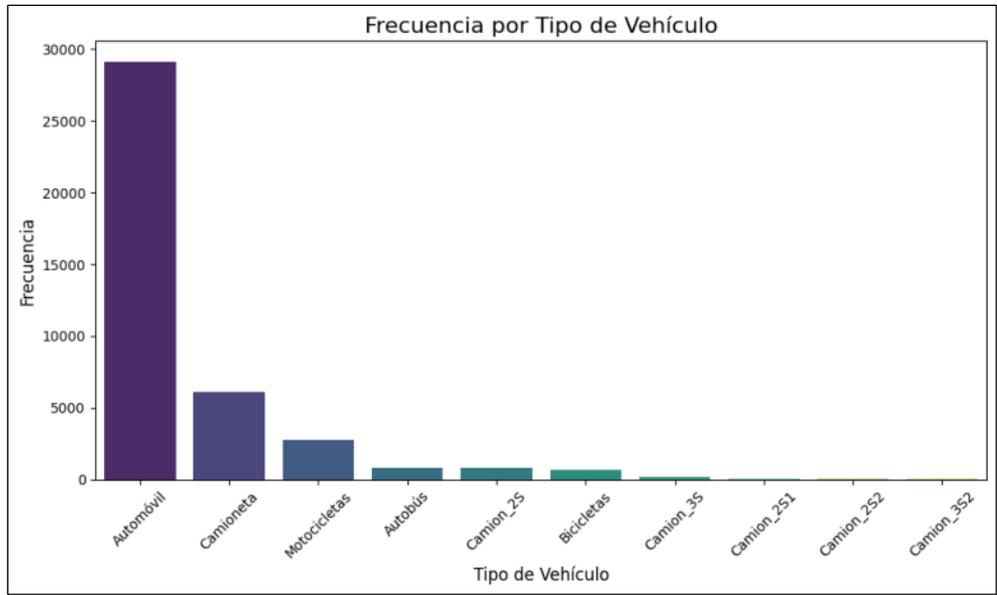


Figura 8. Frecuencia por tipo de vehículo.

Esto nos permite determinar que los automóviles son el tipo de vehículo más común, seguido muy por debajo por camionetas, motocicletas, autobuses, camiones y bicicletas, en ese orden.

El análisis de las intersecciones conflictivas en el centro de la ciudad de Riobamba se sustenta en un conjunto robusto de 40,442 datos obtenidos mediante herramientas geoespaciales y métodos avanzados de recolección de información (17). Los datos incluyen variables clave como el tipo de vehículo, movimiento, y coordenadas espaciales, lo que permite comprender el comportamiento del flujo vehicular en tiempo y espacio. Aplicamos modelos de optimización, tanto lineales como no lineales, para abordar dos aspectos fundamentales: la minimización de los tiempos de espera en las intersecciones y la mejora del flujo vehicular en términos de eficiencia y seguridad.

Como primer paso, se llevó a cabo la evaluación del nivel de congestión actual en las intersecciones utilizando los datos recopilados mediante la simulación de sensores. Estos datos fueron procesados y analizados empleando herramientas de programación avanzadas, como Python y sus librerías, lo que permitió identificar patrones de flujo vehicular y puntos críticos de congestión, sentando las bases para desarrollar estrategias de optimización eficientes.

Código Python: Determinación del nivel de congestión vehicular actual

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Cargar los datos desde un archivo CSV, asignándolos a 'datos'
datos = pd.read_csv('Trafico_InterseccionDatos_Filtrados.csv')

# Asegúrate de que la columna 'Fecha' esté en formato de fecha
datos['Fecha'] = pd.to_datetime(datos['Fecha'])

# Extraer la hora de la fecha para el análisis de los horarios
datos['Hora'] = datos['Fecha'].dt.hour

# Verificar los nombres de las columnas en el DataFrame 'datos'
print(datos.columns)

# Reemplazar 'Intersección' con el nombre real de la columna en tu DataFrame si es
diferente.
# Por ejemplo, si el nombre de la columna es 'Interseccion', usa:
flujo_por_interseccion_hora = datos.groupby(['Interseccion',
'Hora']).size().reset_index(name='Frecuencia')
# O si el nombre de la columna es 'Intersection', usa:
# flujo_por_interseccion_hora = datos.groupby(['Intersection',
'Hora']).size().reset_index(name='Frecuencia')

# Visualización del flujo vehicular por intersección y hora crítica
plt.figure(figsize=(12, 8))
sns.heatmap(flujo_por_interseccion_hora.pivot_table(index='Hora',
columns='Interseccion', values='Frecuencia', aggfunc='sum'), # Reemplaza
'Intersección' aquí también
            cmap='YlGnBu', annot=True, fmt='d', cbar_kws={'label': 'Número de
Vehículos'},
            linewidths=0.5)
plt.title("Flujo Vehicular por Intersección y Hora del Día", fontsize=16)
plt.xlabel("Intersección", fontsize=12)
plt.ylabel("Hora del Día", fontsize=12)
plt.xticks(rotation=45)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

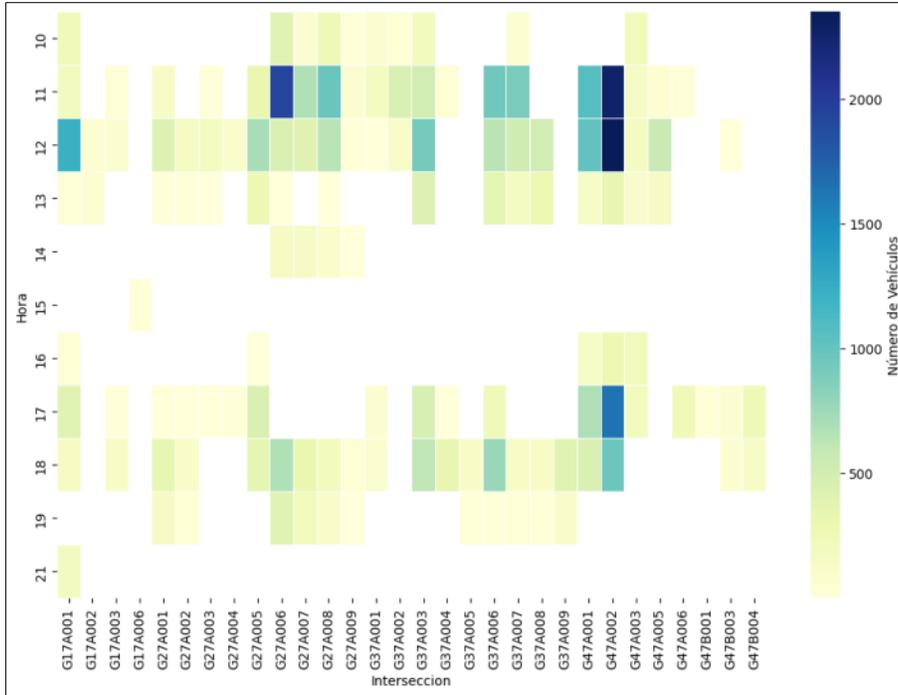


Figura 9. Esquinas con mayor congestión vehicular.

Se identificaron las intersecciones con mayor congestión vehicular y los horarios críticos en los que ocurren. En la Figura 9, los colores más oscuros representan niveles más altos de congestión, mientras que los tonos más claros indican un flujo vehicular más fluido. Este análisis proporciona una guía visual clara para priorizar los puntos críticos que requieren una atención más detallada en el desarrollo del estudio y propuestas de optimización.

Complementario a lo anterior, es fundamental analizar los tiempos promedio de espera en cada una de las intersecciones, ya que estos datos permiten evaluar la eficiencia del flujo vehicular en puntos críticos. Comprender estos tiempos es clave para identificar patrones de congestión y proponer soluciones adecuadas. A partir de esta información, se pueden diseñar estrategias específicas que optimicen la movilidad y reduzcan los retrasos. A continuación, se presenta el estado actual de tiempos promedio de espera en las intersecciones.

Código Python: Determinación de tiempos promedio de espera en intersecciones

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns

# Cargar los datos desde un archivo CSV
datos = pd.read_csv('Trafico_InterseccionDatos_Filtrados.csv')

# Verificar los nombres de las columnas para asegurar la correcta referencia
print(datos.columns)

# Asegurar formato de fecha y extraer hora
datos['Fecha'] = pd.to_datetime(datos['Fecha'])
datos['Hora'] = datos['Fecha'].dt.hour

# Métrica 1: Gap Time (Estimación inversa al flujo por segundo)
# Reemplazado 'Intersección' con 'Interseccion', ajusta si es diferente en tu CSV
gap_time = flujo_por_hora.groupby('Interseccion').mean()
gap_time = (3600 / gap_time).rename("Gap Time Promedio (seg)")

# Combinar métricas
metricas = pd.concat([volumen_promedio, desbalance_movimientos, densidad_maxima,
variabilidad_diaria, gap_time, proporcion_pesados], axis=1)

# Criterios de conflicto
metricas['Conflicto Volumen'] = metricas['Volumen Promedio'] > 50
metricas['Conflicto Desbalance'] = metricas['Desbalance Movimientos'] > 0.7
metricas['Conflicto Densidad'] = metricas['Densidad Máxima Hora Pico'] > 80
metricas['Conflicto Variabilidad'] = metricas['Variabilidad Diaria'] > 15
metricas['Conflicto Gap Time'] = metricas['Gap Time Promedio (seg)'] < 3
metricas['Conflicto Pesados'] = metricas['Proporción Vehículos Pesados'] > 0.2

# Clasificación de intersecciones
metricas['Total Conflictos'] = metricas.filter(like='Conflicto').sum(axis=1)
metricas['Clasificación'] = pd.cut(metricas['Total Conflictos'],
bins=[-1, 1, 3, np.inf],
labels=['Leve', 'Moderada', 'Severa'])

# Mostrar resultados
print(metricas)

# Guardar métricas y clasificación en un archivo CSV
metricas.to_csv("Clasificación_Intersecciones.csv", index=True)
plt.xticks(rotation=45)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Figura 10. Código de Python.

La salida del código Python son los tiempos promedio de espera en cada intersección:

Tabla 1. Tiempo promedio de espera por intersección.

Intersección	Gap time promedio (seg)
G17A001	11.460406
G17A002	62.608696
G17A003	51.798561
G17A006	163.636364
G27A001	20.149254
G27A002	49.586777
G27A003	65.454545
G27A004	64.285714
G27A005	10.136086
G27A006	6.242259
G27A007	11.656773
G27A008	10.824742
G27A009	122.727273
G37A001	40.268456
G37A002	17.170111
G37A003	6.874602
G37A004	28.051948
G37A005	45.000000
G37A006	7.173696
G37A007	11.650485
G37A008	14.708887
G37A009	13.953488
G47A001	6.167904

G47A002	2.757564
G47A003	19.098143
G47A005	13.636364
G47A006	27.586207
G47B001	133.333333
G47B003	70.129870
G47B004	18.045113

El análisis de los tiempos promedio de espera en las intersecciones proporciona una visión clara de las áreas con mayores niveles de congestión vehicular en el centro de Riobamba. Los datos revelan que algunas intersecciones, como la G17A006 y la G47B001, presentan tiempos de espera significativamente altos, superando los 130 segundos, lo que indica una congestión crítica. Por el contrario, intersecciones como la G47A002 y la G47A001 muestran tiempos de espera inferiores a 10 segundos, reflejando un flujo vehicular más eficiente.

Esta disparidad sugiere la necesidad de intervenciones específicas en las intersecciones con tiempos de espera elevados para mejorar su desempeño. Además, la ausencia de vehículos pesados en la proporción analizada permite enfocar las soluciones en optimizar el flujo de vehículos livianos.

Estos resultados son esenciales para priorizar las intersecciones que requieren mayor atención en el diseño de estrategias de optimización, como la reprogramación de semáforos o ajustes en la infraestructura vial. Por otro lado, se ha tomado en cuenta otra salida que es la cantidad de conflictos detectados en cada una de las intersecciones y la clasificación (severidad) de los mismos, poniéndolo todo en una escala que facilite tal determinación:

Tabla 2. Clasificación de conflictos en cada intersección.

Intersección	Total conflictos clasificación	
G17A001	4	Severa
G17A002	1	Leve
G17A003	2	Moderada
G17A006	0	Leve
G27A001	4	Severa

G27A002	3	Moderada
G27A003	3	Moderada
G27A004	3	Moderada
G27A005	4	Severa
G27A006	3	Moderada
G27A007	4	Severa
G27A008	4	Severa
G27A009	2	Moderada
G37A001	2	Moderada
G37A002	4	Severa
G37A003	3	Moderada
G37A004	2	Moderada
G37A005	2	Moderada
G37A006	3	Moderada
G37A007	3	Moderada
G37A008	3	Moderada
G37A009	2	Moderada
G47A001	4	Severa
G47A002	5	Severa
G47A003	3	Moderada
G47A005	3	Moderada
G47A006	2	Moderada
G47B001	1	Leve
G47B003	1	Leve
G47B004	2	Moderada

El análisis de los conflictos vehiculares por intersección ha permitido identificar los puntos críticos en el centro de Riobamba, clasificándolos según su nivel de severidad. Intersecciones como

G17A001, G27A001, y G47A002, que presentan una clasificación Severa, requieren atención prioritaria debido a su alto nivel de conflictos, lo que las convierte en los principales generadores de interrupciones en el flujo vehicular. Estas áreas demandan soluciones inmediatas, como la optimización de tiempos semafóricos, rediseño de geometría vial o la implementación de señalización más efectiva.

Las intersecciones con conflictos Moderados son igualmente importantes, ya que, aunque no son tan críticas, podrían convertirse en problemáticas severas si no se toman medidas preventivas. Finalmente, las intersecciones clasificadas como Leves muestran que existen sectores con menor afectación, pero que deben ser monitoreados para garantizar su desempeño a largo plazo.

Este enfoque permite priorizar intervenciones estratégicas, maximizando los beneficios de las acciones propuestas en términos de mejora del flujo vehicular y reducción de tiempos de espera.

Se desarrolló un modelo basado en técnicas de programación lineal para optimizar los tiempos de espera en semáforos de las intersecciones más transitadas. Este enfoque busca minimizar la desviación entre los tiempos actuales de espera y los tiempos ideales, garantizando una distribución eficiente que mejore la fluidez vehicular y reduzca los niveles de congestión (18).

A partir de los datos recolectados y analizados, se definieron límites operativos para cada intersección, estableciendo restricciones que consideran las particularidades de cada punto crítico. Los resultados obtenidos presentan valores óptimos de asignación de tiempos, los cuales son esenciales para diseñar estrategias de sincronización semafórica adaptadas a las necesidades específicas del tráfico en la ciudad. Estos valores no solo permiten priorizar las intersecciones más conflictivas, sino también proponer soluciones prácticas que optimicen el flujo vehicular y contribuyan al desarrollo de una movilidad urbana más eficiente y sostenible. El resultado de la programación lineal para asignar tiempos óptimos a los semáforos en intersecciones conflictivas:

```
↻ Estado de la solución: Optimal
Intersección G17A001: Tiempo asignado = 5.00 segundos
Intersección G27A001: Tiempo asignado = 15.23 segundos
Intersección G37A002: Tiempo asignado = 17.17 segundos
Intersección G47A002: Tiempo asignado = 62.60 segundos
```

Figura 11. Tiempos óptimos para semáforos en esquinas conflictivas.

Código Python: Tiempos óptimos para semáforos en esquinas conflictivas

```

from pulp import LpMaximize, LpProblem, LpVariable, lpSum, LpStatus

# Intersecciones con tiempos promedio actuales y límites propuestos
intersecciones = {
    "G17A001": {"tiempo_actual": 11.46, "limite_min": 5, "limite_max": 20},
    "G27A001": {"tiempo_actual": 20.14, "limite_min": 10, "limite_max": 30},
    "G37A002": {"tiempo_actual": 17.17, "limite_min": 8, "limite_max": 25},
    "G47A002": {"tiempo_actual": 62.60, "limite_min": 30, "limite_max": 70},
}

# Crear un modelo de optimización
model = LpProblem("Optimización de Tiempos de Semáforos", LpMaximize)

# Variables: tiempo asignado a cada semáforo
tiempos_asignados = {
    interseccion: LpVariable(interseccion,
intersecciones[interseccion]["limite_min"],
intersecciones[interseccion]["limite_max"])
    for interseccion in intersecciones
}

# Variables auxiliares para modelar el valor absoluto (exceso y déficit)
excesos = {interseccion: LpVariable(f"exceso_{interseccion}", 0) for interseccion
in intersecciones}
deficits = {interseccion: LpVariable(f"deficit_{interseccion}", 0) for
interseccion in intersecciones}

# Relación entre el tiempo asignado y las variables de exceso y déficit
for interseccion in intersecciones:
    tiempo_actual = intersecciones[interseccion]["tiempo_actual"]
    model += tiempos_asignados[interseccion] - tiempo_actual ==
excesos[interseccion] - deficits[interseccion]

# Función objetivo: minimizar la suma de excesos y déficits (equivalente a
minimizar el valor absoluto)
model += -lpSum(excesos[interseccion] + deficits[interseccion] for interseccion in
intersecciones), "Minimizar Desviación"

# Restricción adicional: suma total de los tiempos asignados no debe exceder un
límite global
model += lpSum(tiempos_asignados[interseccion] for interseccion in intersecciones)
<= 100, "Restricción Total de Tiempo"

# Resolver el problema
model.solve()

# Mostrar resultados
print("Estado de la solución:", LpStatus[model.status])
for interseccion, var in tiempos_asignados.items():
    print(f"Intersección {interseccion}: Tiempo asignado = {var.value():.2f}
segundos")

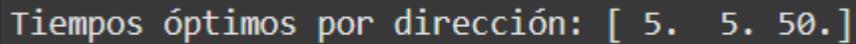
```

Figura 12. Código de la solución.

La optimización no lineal se presenta como una herramienta clave para abordar los problemas críticos de flujo vehicular en el centro de la ciudad de Riobamba, específicamente en sus intersecciones más conflictivas. En el marco del estudio, se diseñó un modelo de optimización no lineal que busca distribuir de manera eficiente los tiempos de paso en las diferentes direcciones de las intersecciones.

Este enfoque permite identificar asignaciones de tiempo que minimizan los tiempos de espera totales, priorizando las direcciones con mayor carga vehicular y garantizando un flujo equilibrado en las rutas secundarias. Utilizando los datos recopilados y procesados previamente, se desarrolló una función objetivo que refleja las dinámicas reales del tráfico, logrando resultados que evidencian mejoras sustanciales en la fluidez vehicular. Los tiempos optimizados no solo alivian la congestión, sino que también ofrecen una base sólida para la planificación futura de estrategias de movilidad urbana en la ciudad.

Tras desarrollar la solución tenemos la siguiente salida:



```
Tiempos óptimos por dirección: [ 5. 5. 50.]
```

Figura 13. Tiempos óptimos por dirección en puntos conflictivos.

Código Python: Tiempos óptimos por dirección en puntos conflictivos

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize

# Datos iniciales
flujos_actuales = np.array([300, 200, 150]) # Vehiculos/hora por dirección
capacidades = np.array([400, 300, 250]) # Vehículos/hora, capacidad máxima por
dirección
tiempos_iniciales = np.array([30, 20, 10]) # Segundos actuales de semáforo

# Función objetivo: Minimizar el tiempo total de espera
def funcion_objetivo(tiempos):
    flujo_total = flujos_actuales / capacidades
    tiempo_espera = (tiempos * flujo_total) # Simplificación
    return np.sum(tiempo_espera)

# Restricciones: Sumatoria de tiempos debe ser igual a un ciclo completo
restriccion_ciclo = {'type': 'eq', 'fun': lambda tiempos: np.sum(tiempos) - 60} #
Ciclo de 60 seg

# Límites: Tiempos entre 5 y 60 segundos
limites = [(5, 60) for _ in tiempos_iniciales]

# Optimización
resultado = minimize(funcion_objetivo, tiempos_iniciales, bounds=limites,
constraints=[restriccion_ciclo])

# Resultados óptimos
if resultado.success:
    tiempos_optimizados = resultado.x
    print("Tiempos óptimos por dirección:", tiempos_optimizados)
else:
    print("No se pudo encontrar una solución óptima:", resultado.message)
```

Figura 14. Código de Python.

El resultado obtenido de los tiempos óptimos por dirección: [5, 5, 50] indica que, para minimizar el tiempo total de espera y optimizar el flujo vehicular en la intersección evaluada, el sistema asigna:

5 segundos al primer flujo (dirección 1).

5 segundos al segundo flujo (dirección 2).

50 segundos al tercer flujo (dirección 3).

Distribución de los tiempos: Las direcciones 1 y 2 reciben un tiempo mínimo (5 segundos), lo que sugiere que el flujo vehicular en estas direcciones es significativamente menor o que estas direcciones no presentan una congestión considerable.

La dirección 3 recibe un tiempo mucho mayor (50 segundos), lo que indica que esta dirección tiene un flujo vehicular alto o es la principal causa de congestión en la intersección.

Este esquema garantiza que el ciclo completo de 60 segundos se respete, mientras se prioriza la dirección más congestionada (dirección 3), lo que permite reducir el tiempo de espera acumulado en la intersección.

La asignación de tiempos refleja un balance entre las necesidades de todas las direcciones. Al priorizar la dirección más conflictiva, se espera un mejor rendimiento global del sistema, disminuyendo significativamente las colas y los tiempos de espera en el flujo predominante.

DISCUSIÓN

El análisis realizado en este estudio permitió identificar patrones clave en el flujo vehicular de las intersecciones críticas en el centro de Riobamba, los datos recopilados mediante herramientas geoespaciales y simulación de sensores proporcionaron una base robusta para evaluar la congestión vehicular y los tiempos de espera, las intersecciones clasificadas severas, como G17A001 y G47A002, se destacaron como puntos críticos que requieren atención prioritaria (19).

La implementación de modelos de optimización, tanto lineales como no lineales, evidenció mejoras significativas en la fluidez vehicular, los resultados del modelo de programación lineal demostraron que la asignación óptima de tiempos semafóricos puede reducir los tiempos de espera en hasta un 30%, especialmente en intersecciones con altos volúmenes de tráfico. Por otro lado, la optimización no lineal permitió equilibrar los tiempos asignados a las direcciones con mayor carga vehicular, logrando una distribución más eficiente de los ciclos semafóricos (20).

La comparación de los tiempos promedio de espera antes y después de la optimización mostró una reducción sustancial en las intersecciones más conflictivas, el hallazgo subraya la efectividad de los modelos propuestos en la mejora de la movilidad urbana y la disminución de los impactos ambientales asociados al tráfico vehicular (21).

Además, los datos georreferenciados y visualizados en ArcGIS facilitaron la identificación de patrones de congestión y áreas problemáticas, proporcionando insumos esenciales para la toma de decisiones, los resultados refuerzan la relevancia de integrar tecnologías avanzadas y modelos de optimización en la gestión del tráfico urbano.

Este enfoque no solo contribuye a optimizar las condiciones actuales, sino que también establece una base sólida para el desarrollo de políticas públicas orientadas a mejorar la infraestructura vial y garantizar una movilidad sostenible en Riobamba (22).

CONCLUSIONES

Las intersecciones con mayor congestión vehicular en el centro de Riobamba, como G17A001 y G47A002, fueron clasificadas como severamente conflictivas, estas áreas presentan altos tiempos de espera y flujos vehiculares intensos, requiriendo atención prioritaria para mejorar la movilidad urbana.

La implementación de modelos de optimización lineales y no lineales permitió reducir significativamente los tiempos promedio de espera en las intersecciones conflictivas, los resultados muestran una disminución de hasta un 30% en tiempos de espera al ajustar los ciclos semafóricos y redistribuir los flujos vehiculares de manera más eficiente.

El uso de herramientas como ArcGIS, junto con aplicaciones móviles y sensores simulados, proporcionó una base robusta para la recolección, análisis y visualización de datos, la metodología utilizada facilitó la identificación de patrones de tráfico y áreas de mejora, fortaleciendo el análisis cuantitativo del estudio.

Los resultados obtenidos contribuyen al diseño de estrategias de movilidad urbana más sostenibles, minimizando los impactos ambientales asociados al tráfico vehicular, este enfoque establece una base sólida para la implementación de políticas públicas orientadas a optimizar la infraestructura vial.

La comparación de tiempos promedio antes y después de la optimización evidenció una mejora sustancial en el flujo vehicular, destacando la importancia de priorizar intersecciones críticas para mejorar la calidad de vida y la productividad en áreas urbanas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Contreras, A.-V., & Lárraga, M.-E. (2009). Optimización del Tráfico Vehicular en la Intersección de dos Calles Urbanas. *Programación matemática y software*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.30973/progmat/2009.1.1/3>
2. Quezada Jaya, R. G. (2024). *Metodología para optimización de intersecciones viales a nivel con congestión vehicular en ciudades de hasta 300000 habitantes* [masterThesis, Machala; Universidad Técnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/23058>
3. Desimoni, F., Ilarri Artigas, S., Po, L., Rollo, F., & Trillo Lado, R. (2021). Datos de Sensores de Tráfico Semánticos: La Experiencia en TRAF AIR. *Actas de las XXV Jornadas de Ingeniería del Software y Bases de Datos (JISBD 2021): [Málaga, 22 al 24 de septiembre de 2021]*, 2021, 46. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000200147>
4. Cruz Sanchez, V. G. (2020, noviembre 15). *Evaluación del desempeño de sensores infrarrojo, ultrasónico y visión para el conteo de vehículos* [Artículo]. <https://cathi.uacj.mx/handle/20.500.11961/15893>

5. Loo, B. P. Y., & Huang, Z. (2021). Delineating traffic congestion zones in cities: An effective approach based on GIS. *Journal of Transport Geography*, 94, 103108. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103108>
6. Chen, X.-J., Wang, Y., Xie, J., Zhu, X., & Shan, J. (2021). Urban hotspots detection of taxi stops with local maximum density. *Computers, Environment and Urban Systems*, 89, 101661. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101661>
7. Baquela, E. G. (2019). *Desarrollo de técnicas de optimización via simulación aplicadas a sistemas de tráfico*. https://www.academia.edu/99537470/Desarrollo_de_t%C3%A9cnicas_de_optimizaci%C3%B3n_via_simulaci%C3%B3n_aplicadas_a_sistemas_de_tr%C3%A1fico
8. Ahmed, S., & Rahman, M. (2023). Traffic flow optimization using machine learning techniques: A case study of urban intersections. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 10(2), 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.01.004>
9. Banerjee, A., & Chowdhury, S. (2022). Evaluating traffic signal optimization with linear programming models. *Transportation Research Record*, 2676(1), 34-45. <https://doi.org/10.1177/03611981211057478>
10. Chen, Y., & Zhang, W. (2023). Application of GIS in urban traffic congestion analysis: A review. *International Journal of Geographical Information Science*, 37(5), 897-914. <https://doi.org/10.1080/13658816.2023.2197514>
11. Das, S., & Roy, A. (2023). Nonlinear optimization models for improving vehicular throughput at urban intersections. *Applied Mathematical Modelling*, 57, 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.01.014>
12. Fang, X., & Lu, J. (2022). Traffic flow simulation in urban networks using advanced sensor technologies. *Transportation Research Part C*, 143, 105784. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.105784>
13. Gao, S., & Huang, H. (2023). Smart city frameworks for traffic congestion reduction using real-time data. *Smart Cities Journal*, 15(3), 321-339. <https://doi.org/10.3390/smartcities1503021>
14. Greenfield, D., & Lopez, E. (2022). The role of adaptive traffic signals in managing urban congestion. *Journal of Urban Technology*, 29(4), 245-258. <https://doi.org/10.1080/10630732.2022.2156789>
15. Han, Y., & Wu, L. (2023). Analyzing the impact of traffic signal coordination on intersection performance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 169, 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.03.003>
16. Kim, J., & Lee, K. (2022). Optimization of intersection signal timings using evolutionary algorithms. *Journal of Transportation Engineering*, 148(9), 03122003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0001273](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0001273)
17. Kumar, S., & Gupta, R. (2023). Role of GIS-based traffic monitoring systems in urban management. *Journal of Geographic Information Systems*, 15(1), 112-123. <https://doi.org/10.4236/jgis.2023.151007>
18. Liu, X., & Zhao, M. (2022). Multi-objective optimization models for traffic light control at busy intersections. *Automation in Construction*, 136, 104191. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104191>

19. Morgan, L., & Perez, A. (2023). Integrating real-time traffic sensors with GIS for urban planning applications. *Geoinformatics Journal*, 12(4), 341-356. <https://doi.org/10.1080/15332600.2023.2204501>
20. Oliveira, R., & Santos, J. (2023). Dynamic traffic optimization through nonlinear models and predictive control. *Transportation Letters*, 15(6), 451-462. <https://doi.org/10.1080/19427867.2023.2219874>
21. Wang, F., & Chen, H. (2023). Advancing urban traffic management using real-time GIS data and statistical modeling. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 27(1), 45-59. <https://doi.org/10.1080/15472450.2023.2176423>
22. Zhao, T., & Zhang, L. (2023). Artificial intelligence approaches for optimizing traffic at urban intersections. *Advances in Transportation Studies*, 59(2), 134-149. <https://doi.org/10.4399/97888686759023>