

Optimización de la Planificación de la Oferta Académica mediante Algoritmos de Inteligencia Artificial.

Tesis de Pregrado

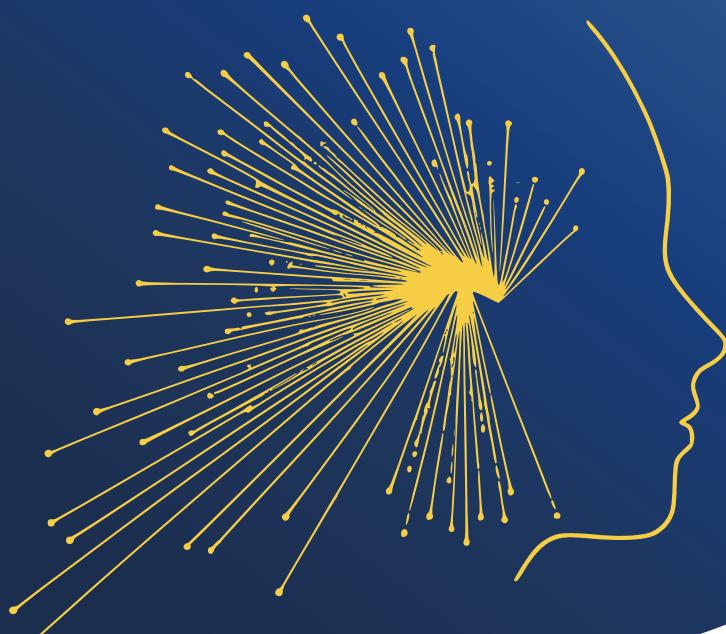
FACULTAD
DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

Presentada por:
Joaquin David Buezo Rosa

Asesor Metodológico:
PhD. Óscar Guillermo Hernández Ramírez

Asesor Técnico:
MSc. Elías Emilio Flores Domínguez



Abril del 2026



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS

Campus
Comayagua

Campus
Comayagua



UNAH
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE HONDURAS



Optimización de la Planificación de la Oferta Académica mediante Algoritmos de Inteligencia Artificial.

Joaquin David Buezo Rosa 

Asesor Metodológico: PhD. Óscar Guillermo Hernández
Ramírez 
PhD., Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Asesor Técnico: MSc. Elías Emilio Flores Domínguez 
MSc., Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales
Licenciatura en Ingeniería en Sistemas

Tesis de Pregrado

Comayagua, Abril 2026

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

PHD. ODIR AARÓN FERNÁNDEZ FLORES
RECTOR

MÁSTER. JOSÉ ALEXANDER ÁVILA VALLECILLO
SECRETARIO GENERAL

DRA. LOURDES ROSARIO MURCIA CARBAJAL
VICERRECTORA ACADÉMICA

MÁSTER MILTHON MOISÉS REYES SOSA
DIRECTOR DEL CENTRO

MÁSTER JOSÉ GÁMEZ SUAZOO
SECRETARIO ACADÉMICO

PHD. EDIS FRANCISCO ROMERO MEJIA
JEFE DE DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

Acerca del Autor

Joaquin David Buezo Rosa



Estudiante de Ingeniería en Sistemas

Universidad Nacional Autónoma de Honduras

Campus Comayagua

ORCID: 0009-0001-4129-0329

Google Scholar: Joaquin David Buezo Rosa

LinkedIn: Joaquin David Buezo Rosa

GitHub: @joasro

Email: joaquin.buezo@unah.hn

Ingeniero en Sistemas por la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (2026). Su formación se orientó al desarrollo de soluciones tecnológicas basadas en programación, análisis de datos e inteligencia artificial, con énfasis en la optimización de procesos académicos.

Se desarrollaron sistemas web, bases de datos y modelos predictivos aplicados a la planificación académica en UNAH-Comayagua, mediante el análisis de datos históricos de matrícula. Sus intereses de investigación se centraron en la minería de datos educativa y en la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para la optimización de la oferta académica.

Identificadores Académicos:

Lenguajes: C#, Python, TypeScript, JavaScript, SQL, L^AT_EX

Data Science: Pandas, NumPy, Scikit-learn, Matplotlib, Seaborn, SciPy

Frameworks y Entornos: Express.js, Firebase, Streamlit, Node.js

Bases de Datos: MySQL

Redes y Simulación: Cisco Packet Tracer (BGP, enrutamiento, diseño de redes)



Optimización de la Planificación de la Oferta Académica mediante Algoritmos de Inteligencia Artificial.

Copyright © 2026 - Joaquin David Buezo Rosa, Facultad de Ingeniería.

Esta tesis es un trabajo original, escrito exclusivamente para este fin, y todos los autores cuyos estudios y publicaciones han contribuido a ella han sido debidamente citados. Se permite la reproducción parcial con el reconocimiento del autor y la referencia al título, año académico, institución —*Universidad Nacional Autónoma de Honduras*— y fecha de defensa pública.



Tu quiere mi pinga en tu culo.

— Flyysoulja

*A mis padres,
por su amor y apoyo incondicional.*

*A mis hermanas,
por su inspiración y compañía.*

*A mi sobrino,
a quien deseo inspirar y motivar a perseguir sus sueños.*

*A mis maestros,
por compartir su conocimiento y sabiduría.*

Motivación

La motivación fundamental para el desarrollo de la presente investigación surgió de la experiencia directa vivida dentro del entorno universitario, donde se evidenció la necesidad crítica de optimizar los procesos de gestión académica. Durante los últimos años de la carrera, se observó cómo la falta de una planificación basada en datos generaba una constante incertidumbre en la población estudiantil, afectando la toma de decisiones sobre qué asignaturas cursar y provocando, en múltiples ocasiones, la imposibilidad de inscribir clases esenciales para el avance del flujo curricular.

Esta problemática se identificó no como un hecho aislado, sino como una realidad sistemática en la que el Censo Académico no cumplía su función predictiva, resultando en una oferta de horarios desconectada de la demanda real. Se experimentó la dificultad de acceder a cupos en asignaturas críticas y el impacto negativo que esto conllevó en el tiempo de graduación, lo que impulsó el interés por investigar cómo las herramientas tecnológicas modernas podrían mitigar estas ineficiencias y transformar la experiencia administrativa y educativa.

En consecuencia, se planteó el desafío de trascender la simple observación del problema para proponer una solución técnica y rigurosa. Se buscó aplicar los conocimientos adquiridos en ingeniería de sistemas e inteligencia artificial para diseñar un modelo capaz de anticipar la demanda y optimizar la distribución de recursos. El objetivo se centró en demostrar que la implementación de algoritmos predictivos podía sustituir la intuición por la precisión matemática, reduciendo así la fricción que los estudiantes enfrentan periodo tras periodo al intentar armar sus horarios.

Finalmente, este trabajo se concibió bajo el compromiso de aportar un legado funcional a la comunidad universitaria. La investigación se orientó a sentar las bases para una gestión académica más ágil y justa, donde la tecnología sirviera como un puente para garantizar que la oferta educativa respondiera verdaderamente a las necesidades de los estudiantes, promoviendo así un entorno más ordenado y propicio para el éxito profesional de las futuras generaciones.

Agradecimientos

A mi Compita, **Gemini 3 Pro**, por hacerme una parte del trabajo.

A mi Doggy, **Chat Yipiti**, por hacer la otra parte.

Resumen

Esta tesis se centra en la evaluación del flujo vehicular en las principales intersecciones de la ciudad de Comayagua que experimentan congestión. Inicialmente, se aplicó la observación directa como técnica para estimar el volumen de tráfico que circula por estas zonas críticas.

Posteriormente, se realizó un análisis de la red vial mediante la teoría de grafos, utilizando las librerías de Python OSMx y NetworkX. Buscando identificar las intersecciones (nodos) con una alta puntuación de centralidad, que son esenciales para conectar la mayoría de las rutas más cortas. Una vez definidas las calles críticas, se ejecutó una simulación de tráfico con la herramienta SUMO bajo tres escenarios: el flujo base, un incremento del 30 %, y una duplicación del flujo vehicular. Además, se comparó el desempeño del tráfico en el nodo crítico al emplear un semáforo contra la instalación de una rotonda.

Los resultados demostraron una mejora significativa en la movilidad, evidenciada por un aumento en la velocidad media, una reducción del tiempo perdido, y un incremento en las paradas por vehículo, sugiriendo una mayor fluidez. Validando la factibilidad de emplear la teoría de grafos y herramientas de simulación para proponer estrategias efectivas de descongestión vehicular y fundamentar la toma de decisiones.

Palabras Clave: Tráfico vehicular, Teoría de grafos, Simulación, Congestionamiento

Abstract

This thesis focuses on evaluating vehicular flow at the main intersections of the city of Comayagua that experience congestion. Initially, direct observation was applied as a technique to estimate the traffic volume circulating through these critical areas.

Subsequently, a road network analysis was conducted using graph theory, employing the Python libraries OSMnx and NetworkX. The objective was to identify intersections (nodes) with a high centrality score, which are essential because they connect most of the shortest routes. Once the critical streets were defined, a traffic simulation was executed using the SUMO tool under three scenarios: the baseline flow, a 30

The results demonstrated a significant improvement in mobility, evidenced by an increase in average speed, a reduction in lost time, and an increase in stops per vehicle, suggesting greater fluidity. This validates the feasibility of using graph theory and simulation tools to propose effective vehicular decongestion strategies and support decision-making.

Keywords: Vehicular Traffic, Graph Theory, Simulation, Congestion

Índice general

<i>Índice de figuras</i>	xiv
<i>Índice de tablas</i>	xvii
<i>Glosario de Acrónimos</i>	xix
I PRESENTACIÓN	1
1. Introducción	2
1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Objetivos de la investigación	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Preguntas de investigación	4
1.4. Justificación de la investigación	4
1.4.1. Justificación Teórica y Técnica	4
1.4.2. Justificación Práctica y Administrativa	5
1.4.3. Justificación Económica	5
1.4.4. Justificación Social	5
1.5. Alcances y limitaciones	6
II Marco Teórico / Estado del arte	7
2. Investigaciones previas relacionadas	8
2.1. Antecedentes y estado actual de la investigación	9
2.2. Estado del arte	10
3. Educación Superior y Modalidades	12
3.1. Contexto Actual y Transformación Digital en la Educación Superior	13
3.2. Modalidades educativas y su impacto en la gestión de recursos	15
3.2.1. Educación Presencial, Virtual e Híbrida	16

3.2.2. Requerimientos físicos y tecnológicos por modalidad	16
3.3. La gestión administrativa en los centros universitarios	17
3.3.1. Impacto Económico de la Planificación Académica	18
3.3.2. Complejidad Logística de la Asignación de Horarios	19
4. Planificación Académica y Distribución de Cargas	21
4.1. El proceso de programación de la oferta académica	22
4.2. La Cadencia Académica y el flujo curricular	24
4.2.1. Importancia de la secuencia de asignaturas	25
4.2.2. Tiempos y ciclos de matrícula	26
4.3. Problemáticas en la distribución de secciones	26
4.3.1. Subestimación de cupos y saturación	28
4.3.2. Impacto de la mala distribución en el egreso estudiantil	28
5. Movilidad Inteligente	30
5.1. Evolución de los sistemas de transporte inteligente (ITS)	31
5.1.1. Orígenes y primeros desarrollos	31
5.1.2. Comunicación Vehicular	31
5.1.3. Control Adaptativo y métodos basados en inteligencia artificial	32
5.1.4. Tecnologías emergentes y comunicación no tradicional	32
5.2. Herramientas tecnológicas aplicadas al control del tráfico	33
6. Teoría de Grafos	35
6.1. Conceptos principales de teoría de grafos	36
6.1.1. Definición de grafo	36
6.1.2. Nodos	36
6.1.3. Grafos dirigidos y no dirigidos	37
6.1.4. Grafos ponderados (Pesos y Costos)	37
6.2. Propiedades relevantes en redes de tráfico	38
6.2.1. Grados de los nodos (entradas/salidas)	38
6.2.2. Caminos y rutas	38
6.2.3. Grafos Conexos	39
6.2.4. Subgrafos relevantes	39
6.3. Algoritmos aplicados al análisis vial	40
6.3.1. Algoritmos de camino (Dijkstra y A*)	40
6.3.2. Algoritmo de flujo máximo (FordFulkerson)	42
6.3.3. Análisis de centralidad	43
6.4. Detección de nodos críticos y vulnerabilidad de la red	45
6.5. Simulación del tráfico vehicular con grafos	46



6.6. Retos y limitaciones de la teoría de grafos en la movilidad urbana	48
7. Contexto Específico del Estudio	49
7.1. Panorama de la movilidad vehicular en Honduras	50
7.2. Características del tráfico en la ciudad de Comayagua	51
7.3. Principales avenidas e intersecciones críticas en Comayagua	52
7.4. Relevancia del uso de inteligencia artificial en la ciudad	56
8. Marco Conceptual	58
8.1. Glosario conceptual del estudio	59
9. Marco Legal	61
9.1. Normativa legal y estándares técnicos	62
9.2. Normativa regional (Latinoamérica)	62
9.3. Marco Legal Nacional (Honduras)	63
9.4. Consideraciones éticas y de seguridad de la información	63
III Marco Metodológico	65
10. Metodología	66
10.1. Tipo de investigación	67
10.2. Diseño Metodológico	67
10.3. Involucrados en la investigación	68
10.3.1. Principales involucrados	68
10.3.2. Otros involucrados	68
10.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	69
10.5. Procedimiento	70
10.6. Herramientas tecnológicas utilizadas	72
10.7. Métodos de validación	74
10.7.1. Métricas de evaluación del modelo	74
10.7.2. Casos de uso	76
IV Implementación de la propuesta tecnológica	79
11. Implementación	80
11.1. Diseño de la Solución tecnológica	81
11.1.1. Arquitectura general del sistema	82
11.1.2. Flujo de procesos	83
11.2. Implementación	84



11.2.1. Preparación y estructuración de los datos	84
11.2.2. Desarrollo del modelo de análisis basado en teoría de grafos	84
11.2.3. Integración con la simulación de tráfico	85
11.2.4. Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas	87
11.2.5. Validación inicial del sistema	87
11.3. Pruebas y resultado preliminares	87
11.3.1. Análisis de la red vial mediante la teoría de grafos	87
11.3.2. Pruebas de simulación en SUMO	88
11.3.3. Pruebas de carga	89
V Resultados y Análisis	91
12. Resultados y Análisis	92
12.1. Presentación de Resultados	93
12.2. Interpretación y análisis de los resultados obtenidos	103
12.2.1. Análisis de Escenarios de Demanda Creciente	104
12.2.2. Evaluación de la Propuesta de Mitigación (Rotonda vs. Semáforo) .	105
12.3. Comparación con Investigaciones Previas o Estándares	105
12.3.1. Niveles de Servicio (NdS) y Vulnerabilidad	106
12.3.2. Comparación de Soluciones: Semáforo vs. Rotonda	106
12.4. Validación de objetivos planteados	107
VI Conclusiones y Recomendaciones	109
13. Conclusiones y recomendaciones	110
13.1. Conclusiones generales	111
13.2. Aportes tecnológicos y prácticos de la investigación	112
13.3. Limitaciones encontradas durante la implementación	112
13.4. Recomendaciones	113
13.5. Trabajos Futuros	114
VII Referencias	117
<i>Bibliografía</i>	119
VIII Anexos	131
14. Anexos	132

Índice de figuras

5.1. Tecnologías de comunicación vehicular V2V y V2I.	32
6.1. Representación gráfica de un grafo simple	36
6.2. Ejemplo de subgrafo en un grafo simple	40
7.1. Evolución del parque vehicular en Honduras.	50
7.2. Intersección Bulevar 4 Centenario y Carretera RN-57	53
7.3. Intersección Bulevar 4 Centenario con 4a Calle S.O y antigua CA-5	54
7.4. Intersección Calle Cero	55
7.5. Intersección CA-5, Carretera RV-217 y RN-68	56
11.1. Arquitectura del Sistema de Análisis y Optimización del Tráfico Vehicular . .	83
11.2. Flujo de procesos del sistema de análisis y optimización del tráfico vehicular .	84
11.3. Grafo inicial de la red vial de la Ciudad de Comayagua	88
11.4. Configuración del flujo vehicular en Netedit	89
11.5. Simulación de Escenarios en sumo-gui	90
12.1. Pronóstico del Parque Vehicular en Honduras	93
12.2. Análisis Topológico y de Vulnerabilidad: Centralidad de Intermediación de la Red Vial de Comayagua	94
12.3. Simulación de Velocidad Media bajo Escenarios de Crecimiento Vehicular . .	95
12.4. Simulación de Pérdida de Tiempo bajo Escenarios de Crecimiento Vehicular .	96
12.5. Simulación de Paradas por Vehículo bajo Escenarios de Crecimiento Vehicular	97
12.6. Impacto de la Rotonda en la Velocidad Media	98
12.7. Impacto de la Rotonda en la Pérdida de Tiempo	99
12.8. Impacto de la Rotonda en la Paradas por Vehículo	100
12.9. Datos Comparativos de la intersección Bulevar 4 Centenario y Carretera RN-57	101
12.10. Datos Comparativos de la intersección Bulevar 4 Centenario y Calle 0	102
12.11. Datos Comparativos de la intersección frente al Hospital Santa Teresa	103
14.1. Interfaz de SUMO NETEDIT para la edición de redes viales	132

14.2. Equipo de cómputo utilizado para la realización de las simulaciones y análisis de datos	133
--	-----

Índice de tablas

7.1. Parque vehicular clasificado por departamentos	51
12.1. Comparación del desempeño por escenarios y nivel de servicio estimado. . . .	106

Glosario de Acrónimos

ATSC	Sistemas de Control Adaptativo de Señales de Tráfico, Adaptive Traffic Signal Control. (<i>p. 33</i>)
DL	Aprendizaje Profundo, Deep Learning. (<i>p. 32</i>)
GNN	Redes Neuronales Gráficas, Graph Neural Networks. (<i>p. 38</i>)
GPD	Grafo Ponderado y Dirigido. (<i>p. 112</i>)
HCM	Manual de Capacidad de Carreteras, Highway Capacity Manual. (<i>p. 105, 106</i>)
IA	Inteligencia Artificial. (<i>p. 72</i>)
INE	Instituto Nacional de Estadística. (<i>p. 50, 52</i>)
IoT	Internet de las Cosas, Internet of Things. (<i>p. 81</i>)
IoV	Internet de los Vehículos, Internet of Vehicles. (<i>p. 32</i>)
ITS	Sistemas de Transporte Inteligente, Intelligent Transportation System. (<i>p. 31, 32, 36, 62, 63</i>)
NdS	Niveles de Servicio, Levels of Service. (<i>p. 105, 106</i>)
RL	Aprendizaje por Refuerzo, Reinforcement Learning. (<i>p. 32, 33</i>)
SDN	Redes Definidas por Software, SoftwareDefined Networking. (<i>p. 32</i>)
SOTL	Semáforos Autoorganizables, Self-Organizing Traffic Lights. (<i>p. 34</i>)
SUMO	Simulation of Urban Mobility. (<i>p. 46, 47, 69, 71, 72, 82, 85, 86, 93</i>)
TFP	Predicción del Flujo de Tráfico, Traffic Flow Prediction. (<i>p. 32</i>)
TI	Tecnologías de la Información. (<i>p. 31</i>)
V-VLC	Comunicación por Luz Visible entre Vehículos, Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communication. (<i>p. 33</i>)

- V2I** Vehiculo a Infraestructura, Vehicle to Infrastructure. (*p. 31–33*)
- V2V** Vehiculo a Vehiculo, Vehicle to Vehicle. (*p. 31–33*)
- VANETs** Redes Vehiculares Ad hoc, Vehicular Ad hoc Networks. (*p. 31, 32*)

PRESENTACIÓN

1847

1

Introducción

Contenido del Capítulo

1.1. Planteamiento del Problema	3
1.2. Objetivos de la investigación	4
1.2.1. Objetivo General	4
1.2.2. Objetivos Específicos	4
1.3. Preguntas de investigación	4
1.4. Justificación de la investigación	4
1.4.1. Justificación Teórica y Técnica	4
1.4.2. Justificación Práctica y Administrativa	5
1.4.3. Justificación Económica	5
1.4.4. Justificación Social	5
1.5. Alcances y limitaciones	6

1.1. Planteamiento del Problema

A nivel mundial, la educación superior atraviesa una crisis de "masificación" sin precedentes. Según datos de la UNESCO[1], la matrícula universitaria global se ha triplicado en los últimos años, tomando de referencia desde el año 2000 hasta datos más recientes en 2024, pasando de 100 millones a más de 264 millones de estudiantes, lo que ha generado una presión insostenible sobre la infraestructura y los recursos docentes de las instituciones públicas. Este crecimiento desmedido, si no se gestiona con herramientas de planificación estratégica, deriva en la saturación de aulas y la incapacidad de las universidades para ofrecer los cupos necesarios que la población estudiantil demanda [1].

La ineficiencia en la gestión de la oferta académica tiene consecuencias directas en el éxito estudiantil. El Banco Mundial[2] señala que en América Latina, aproximadamente el 46 % de los estudiantes que ingresan a la educación superior logran graduarse, y de ellos, una gran mayoría tarda hasta un 40 % más del tiempo estipulado en su plan de estudios. Este fenómeno, conocido como el rezago académico, es alimentado en gran medida por la falta de disponibilidad de asignaturas críticas, lo que obliga a los estudiantes a extender su permanencia en la universidad, elevando los costos operativos para el Estado y retrasando su inserción en el mercado laboral.

En el contexto regional, la Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) ha identificado debilidades críticas en la gestión universitaria. Según el informe diagnóstico de la región, el ecosistema digital apenas alcanzaba un 50 % de desarrollo antes de la crisis sanitaria, frente al 80 % de América del Norte[3]. Esta disparidad evidencia una infraestructura tecnológica insuficiente para responder a los retos de la planificación moderna. A esto se suma la falta de pertinencia en la oferta académica; de acuerdo con un estudio sobre competitividad de la misma organización, existe una "importante y creciente brecha" entre la formación universitaria y las necesidades del entorno[4]. Este fenómeno genera ineficiencias en el uso del capital humano y dificulta la inserción laboral de los egresados[4].

A pesar de que la Inteligencia Artificial (IA) y la ciencia de datos han demostrado ser soluciones efectivas para la optimización de recursos en diversos sectores, su adopción en la gestión administrativa de las universidades públicas hondureñas es aún incipiente. Actualmente, la incorporación de tecnologías de la información en la región se ha limitado mayoritariamente a procesos administrativos básicos, desaprovechando su potencial pedagógico y de planificación [2]. Las decisiones sobre la apertura de secciones académicas continúan basándose en la experiencia empírica de las autoridades, lo que ignora el potencial de los datos históricos para predecir escenarios futuros. Esta falta de herramientas analíticas dificulta garantizar una educación inclusiva, equitativa y eficiente, metas alineadas con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) N.^o 4 de la Agenda 2030[5].



1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo General

Optimizar el proceso de planificación de la oferta académica en la carrera de Ingeniería en Sistemas de la UNAH-Comayagua mediante la implementación de algoritmos de inteligencia artificial que permitan una distribución eficiente de los recursos institucionales.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Analizar datos históricos de cargas académicas y matrícula para identificar patrones de demanda en distintas asignaturas.
- Examinar y priorizar las variables académicas y normativas que influyen en la apertura de secciones, tales como mínimos de estudiantes y prioridades académicas.
- Diseñar un modelo predictivo que permita estimar la demanda de secciones académicas en futuros períodos.
- Evaluar el desempeño del modelo a través de un conjunto de datos de prueba a pequeña escala.

1.3. Preguntas de investigación

- ¿Qué patrones de demanda pueden identificarse a partir del análisis de datos históricos de matrícula y cargas académicas?
- ¿Cuáles son las variables académicas y normativas que influyen con mayor peso en la apertura de secciones académicas?
- ¿Cómo puede diseñarse un modelo predictivo basado en aprendizaje automático que permita estimar la demanda futura de secciones académicas?
- ¿Qué nivel de desempeño presenta el modelo predictivo al ser evaluado con datos históricos de prueba?

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación Teórica y Técnica

La presente investigación se justifica en la necesidad de superar las limitaciones de los modelos estadísticos tradicionales utilizados en la gestión educativa. La literatura reciente demuestra que métodos como la regresión lineal o logística son insuficientes para capturar la complejidad no lineal del comportamiento estudiantil actual[6]. Al implementar algoritmos de aprendizaje automático, específicamente Random Forest, este estudio busca llenar un vacío metodológico, validando herramientas que permiten jerarquizar la importancia



de variables demográficas y académicas con una precisión superior al análisis probabilístico estándar[6].

Asimismo, se aborda la programación de horarios como un problema de optimización combinatoria clasificado como NP-Hard[7]. La investigación aporta valor teórico al demostrar que la gestión de restricciones "duras" "blandas"^{en} la asignación de recursos no es eficiente con planificación manual, justificando metaheurísticas y modelos predictivos para soluciones viables en espacios de búsqueda de alta complejidad[7].

1.4.2. Justificación Práctica y Administrativa

Desde una perspectiva operativa, el proyecto responde a la desconexión crítica diagnosticada entre la infraestructura tecnológica y la toma de decisiones estratégicas en las universidades latinoamericanas[8]. A pesar de que las instituciones generan grandes volúmenes de datos, la falta de una cultura de análisis ha convertido a los sistemas de información en simples repositorios pasivos[8]. Esta propuesta ofrece una solución práctica mediante un sistema de soporte a la decisión (DSS) que transforma datos históricos aislados en inteligencia accionable, permitiendo a las autoridades anticipar la demanda real de cupos y evitar la gestión reactiva.

Además, esta investigación responde a los retos de la educación híbrida. Datos de 2025 indican que el 45 % de los problemas docentes se deben a aulas incompatibles con la modalidad virtual[9]. El sistema se justifica al incluir variables de infraestructura física y digital en la planificación, adaptando los espacios a los requisitos técnicos actuales.

1.4.3. Justificación Económica

La optimización de la oferta académica impacta directamente la sostenibilidad financiera de la institución. Predecir mal las tasas de inscripción genera costos innecesarios, como abrir secciones con baja demanda o saturar otras que exigen contratar docentes de emergencia[6]. Esta investigación reduce el error predictivo, mejora la eficiencia presupuestaria y ajusta los recursos a la demanda real, esencial en la Cuarta Revolución Industrial[10].

1.4.4. Justificación Social

Finalmente, el impacto principal es en el éxito estudiantil. La escasez de cupos en asignaturas clave, conocidas como "cuellos de botella", interrumpe el avance curricular y causa retrasos académicos[11]. Mediante análisis de redes, el sistema identifica estos puntos críticos y predice el riesgo de deserción por factores financieros y académicos con una precisión del 98.6 %[12]. De este modo, optimiza procesos, promueve la continuidad educativa, permite el avance sin obstáculos administrativos, reduce las tasas de abandono y facilita la inserción oportuna en el mercado laboral.



1.5. Alcances y limitaciones

Esta investigación comprende el diseño y desarrollo de un prototipo funcional de plataforma digital basada en inteligencia artificial para predecir la demanda académica en UNAH-Comayagua. El sistema procesará registros de intención de matrícula y datos históricos mediante algoritmos de regresión y clasificación. El alcance incluye la creación de perfiles de usuario, un módulo de análisis predictivo y un dashboard de visualización para autoridades. Entre las limitaciones, se reconoce que la variabilidad en la calidad de los datos históricos puede afectar la precisión inicial, y que las pruebas piloto se limitarán a una muestra representativa de X estudiantes debido a restricciones temporales.

- **Viabilidad Técnica:** El proyecto se desarrollará utilizando el lenguaje de programación Python, empleando librerías especializadas como Pandas y Scikit-Learn. La gestión de datos se realizará mediante el motor de base de datos MySQL. La interfaz de usuario será implementada con el framework Streamlit y el código fuente será auditado mediante un repositorio en GitHub.
- **Viabilidad Económica y Operativa:** La investigación cuenta con la viabilidad operativa al disponer del apoyo de la Jefatura de Departamento de UNAH-Comayagua para el acceso a la información. Es económicamente viable al basarse en tecnologías de código abierto, no requiriendo inversión financiera directa por parte de la institución.



Parte II

MARCO TEÓRICO / ESTADO DEL ARTE

2

Investigaciones previas relacionadas

Contenido del Capítulo

2.1. Antecedentes y estado actual de la investigación	9
2.2. Estado del arte	10

2.1. Antecedentes y estado actual de la investigación

En la última década, la gestión académica ha transitado de modelos administrativos estáticos a enfoques dinámicos basados en datos. La literatura reciente coincide en que la sostenibilidad de las instituciones de educación superior depende ahora de integrar tecnología en la planificación operativa, más allá de su oferta pedagógica. No obstante, la adopción de estas herramientas varía según el contexto geográfico y cultural.

Al contrastar las exigencias del entorno global con la realidad operativa latinoamericana, se evidencia una brecha crítica en la gestión de recursos. Mientras que Shenkoya y Kim[10], establecieron que la transformación digital es un imperativo de supervivencia para la sostenibilidad en la Cuarta Revolución Industrial, Gallegos Macías et al[8], demostraron que, en la práctica regional, esta transición es deficiente. A pesar de que las instituciones invierten en infraestructura tecnológica, Gallegos Macías et al. diagnosticaron que los Sistemas de Información Estratégica (SIE) funcionan mayoritariamente como repositorios de datos aislados. Esta desconexión confirma que el problema no es la falta de herramientas digitales, sino la ausencia de una cultura organizacional que alinee los datos operativos con la visión estratégica de sostenibilidad propuesta por Shenkoya y Kim[10].

En el ámbito metodológico, la insuficiencia de los modelos estadísticos tradicionales para predecir la demanda fue validada convergentemente por Shao et al.[6] y Shilbayeh y Abonamah[12]. Ambos estudios coincidieron en que la regresión lineal y logística fallan al intentar capturar la complejidad del comportamiento estudiantil actual. Shao et al.[6] comprobaron que algoritmos de ensamble como Random Forest eran necesarios para detectar interacciones no lineales entre el historial académico y la elección de carrera, una capacidad que los modelos clásicos no poseen. Por su parte, Shilbayeh y Abonamah[12], corroboraron esta superioridad técnica, demostrando que al sustituir los métodos probabilísticos por árboles de decisión (J48), la precisión en la clasificación de estudiantes en riesgo aumentó significativamente, permitiendo una planificación proactiva y no reactiva. La evolución del estado actual de la investigación también ha redefinido qué datos son relevantes para la planificación. Se superó la visión de que el rendimiento académico es el único predictor de la matrícula. Shao et al.[6] jerarquizaron la importancia de las variables (feature importance), revelando que factores demográficos específicos tienen un peso predictivo superior al 35 %. Este hallazgo se complementa con la investigación de Shilbayeh y Abonamah[12], quienes integraron variables financieras en sus modelos, descubriendo una correlación directa (98.6 % de precisión) entre el estatus económico y la deserción. En conjunto, estos autores establecieron que un sistema de predicción robusto debe ser multidimensional, integrando datos académicos, demográficos y financieros para reducir la incertidumbre en la oferta de cupos.

Un avance fundamental en los antecedentes de la optimización académica es el cambio de paradigma en la visualización del plan de estudios. Tradicionalmente, la oferta se planifica-



ba como una lista lineal de asignaturas, un enfoque que Stavrinides y Zuev[11], desafiaron al proponer el modelado mediante Redes de Prerrequisitos de Cursos (CPNs). Al aplicar la teoría de grafos, estos autores demostraron que la complejidad de la gestión no reside solo en la cantidad de alumnos, sino en la topología de la malla curricular.

La aplicación de métricas de centralidad permitió cuantificar fenómenos que antes solo se gestionaban intuitivamente. Stavrinides y Zuev[11], introdujeron el uso de la “Centralidad de Intermediación” (Betweenness Centrality) para detectar asignaturas que actúan como puentes críticos en la red de conocimiento.

Finalmente, la comprensión de la jerarquía curricular se consolidó mediante la estratificación topológica. Stavrinides y Zuev[11], establecieron que los planes de estudio poseen una estructura de niveles de dependencia que dicta el flujo natural de la demanda.

2.2. Estado del arte

En el estado actual del conocimiento, la optimización de la oferta académica supera la estadística tradicional e incorpora computación evolutiva y análisis de sistemas complejos. El estado del arte aborda problemas de asignación intratables para humanos, integrando infraestructura para modalidades híbridas y el comportamiento digital de estudiantes, que redefinen la planificación eficiente.

La resolución del Problema de Horarios Universitarios (UCTP) ha alcanzado un nivel de sofisticación que separa definitivamente la gestión manual de la automatizada. Abdipoor et al.[7], definieron este problema como NP-Hard, estableciendo que la única vía viable para su resolución es el uso de metaheurísticas híbridas.

Una dimensión emergente en el estado del arte es la validación logística de la educación híbrida. Guadalupe Beltrán et al.[9] aportaron evidencia reciente sobre cómo la modalidad mixta ha introducido nuevas restricciones de infraestructura. Su estudio reveló que el 45 % de los fallos en la implementación docente no se deben a la pedagogía, sino a la asignación de aulas físicamente incompatibles con la transmisión digital.

Finalmente, la frontera de la predicción de demanda se ha expandido hacia el análisis de datos no estructurados externos. Li et al.[13] demostraron mediante modelos de ecuaciones estructurales que el comportamiento en redes sociales (eWOM) actúa como un indicador adelantado de la inscripción, estableciendo un nuevo estándar para los sistemas de planificación modernos.

A modo de síntesis, la revisión crítica de la literatura permite constatar que la gestión de la oferta académica ha dejado de ser un problema logístico lineal para constituirse como un desafío multidimensional de ciencia de datos. La evidencia analizada demuestra que, si bien existen herramientas teóricas potentes desde los algoritmos de Random Forest validados por Shao et al.[6], hasta el análisis de grafos curriculares de Stavrinides y Zuev[11],



su aplicación práctica enfrenta la necesidad de integrar variables heterogéneas que los modelos tradicionales ignoraban. Se concluye que el estado del arte actual exige el desarrollo de sistemas holísticos que no solo resuelvan la complejidad combinatoria definida por Abdipoor et al.[\[7\]](#), sino que incorporen simultáneamente las restricciones de infraestructura híbrida y los indicadores de demanda digital externa, cerrando así la brecha existente entre la capacidad computacional avanzada y la realidad operativa de las instituciones educativas.



3

Educación Superior y Modalidades

Contenido del Capítulo

3.1. Contexto Actual y Transformación Digital en la Educación Superior	13
3.2. Modalidades educativas y su impacto en la gestión de recursos	15
3.2.1. Educación Presencial, Virtual e Híbrida	16
3.2.2. Requerimientos físicos y tecnológicos por modalidad	16
3.3. La gestión administrativa en los centros universitarios	17
3.3.1. Impacto Económico de la Planificación Académica	18
3.3.2. Complejidad Logística de la Asignación de Horarios	19

3.1. Contexto Actual y Transformación Digital en la Educación Superior

La educación superior contemporánea enfrenta una coyuntura crítica donde la tecnología ha dejado de ser una herramienta auxiliar para convertirse en el eje vertebrador de la operatividad institucional. En la última década, la gestión universitaria ha tenido que evolucionar forzosamente desde modelos tradicionales, caracterizados por la rigidez administrativa y la presencialidad exclusiva, hacia ecosistemas digitales dinámicos. Esta transición no responde únicamente a una tendencia de modernización, sino a una necesidad de supervivencia ante la masificación estudiantil y la exigencia de optimizar recursos limitados en un entorno globalizado que demanda inmediatez y precisión en la oferta académica.

En este escenario macro, la sostenibilidad institucional se ha vinculado indisolublemente con la capacidad de adaptación tecnológica. Shenkoya y Kim [10] analizaron el impacto de la Cuarta Revolución Industrial (4IR) en la educación, estableciendo que la fusión de tecnologías físicas, digitales y biológicas está desdibujando las fronteras tradicionales del campus. Según su investigación, la educación superior actúa como un motor crítico para el desarrollo sostenible, pero solo si logra integrar la transformación digital en sus procesos de “conocimiento abierto”. Los autores sostienen que las universidades que no alinean su gestión con estos principios de la 4IR corren el riesgo de obsolescencia, ya que la innovación tecnológica es ahora el principal conductor de la relevancia académica y social.

Sin embargo, esta integración tecnológica no ha estado exenta de fricciones estructurales. Guàrdia et al. [14] realizaron una revisión exhaustiva de tendencias, destacando que impactos inesperados, como la pandemia global, obligaron a gobiernos y universidades a re-examinar todos los componentes de los sistemas existentes. Su estudio revela que, aunque la migración a formatos en línea fue rápida, la calidad y la aceptación variaron enormemente. La investigación identificó que el desafío actual ya no es la conectividad, sino la eficiencia pedagógica y administrativa de estas tecnologías. Se detectó una necesidad urgente de pasar de la improvisación remota a una planificación estratégica que utilice la tecnología para mejorar las tasas de finalización y el aprendizaje real, superando la simple digitalización de contenidos.

La correlación entre la necesidad de reforma estructural y la sostenibilidad operativa es evidente al cruzar los hallazgos de Shenkoya y Kim [10] con la evaluación de tendencias de Guàrdia et al. [14]. Ambos estudios convergen en la premisa de que la educación superior no puede sostenerse bajo paradigmas analógicos en una era digital; mientras Guàrdia et al. [14] señalan que la falta de planificación tecnológica compromete la calidad y la retención, Shenkoya y Kim [10] advierten que esta carencia impide el desarrollo de un ecosistema de conocimiento abierto, concluyendo que la transformación digital es el único mecanismo viable para alinear la eficiencia administrativa con las demandas sociales contemporáneas.



Dentro de las herramientas tecnológicas disponibles para afrontar este reto, la Inteligencia Artificial (IA) ha emergido como el campo de mayor crecimiento y potencial disruptivo. Crompton y Burke [15] llevaron a cabo una revisión sistemática del estado del arte entre 2016 y 2022, hallando un crecimiento exponencial en la literatura científica: las publicaciones sobre IA en educación superior se duplicaron e incluso triplicaron en los años 2021 y 2022 en comparación con períodos anteriores. Un hallazgo clave de su estudio es el desplazamiento geopolítico de la innovación; mientras que históricamente Estados Unidos lideraba la investigación, China ha asumido el liderazgo en la producción de soluciones de IA educativa. Además, se evidenció que la mayor parte de esta tecnología se está aplicando en el nivel de pregrado, validando la pertinencia de enfocar los esfuerzos de optimización en este segmento demográfico masivo.

La aplicación de estas herramientas de IA ha permitido profundizar en la comprensión de las problemáticas estudiantiles con un nivel de detalle inédito. Al-Azzam y Al-Oudat [16] propusieron recientemente modelos basados en aprendizaje automático y Grandes Modelos de Lenguaje (LLM) para clasificar y predecir desafíos académicos y psicológicos. Su investigación demuestra que la tecnología puede ir más allá de la gestión administrativa para identificar patrones de bienestar y rendimiento. Al utilizar algoritmos de clasificación, lograron detectar dificultades que tradicionalmente pasaban desapercibidas en la gestión manual, subrayando que la “salud” del sistema educativo depende de la capacidad de procesar datos complejos sobre el estado del estudiante, no solo sus calificaciones.

Finalmente, el perfil del estudiante moderno se ha transformado en un agente digital cuyas decisiones están fuertemente influenciadas por entornos no académicos. Li et al. [13] exploraron cómo la comunicación en redes sociales y la imagen de marca institucional determinan las intenciones de inscripción. Mediante un modelo de ecuaciones estructurales (SEM), comprobaron que el “Boca a Boca Electrónico” (eWOM) tiene un impacto positivo significativo sobre la percepción de la universidad. Esto implica que la planificación de la oferta académica ya no puede basarse únicamente en históricos internos; debe considerar que la demanda es volátil y sensible a la interacción digital. Los autores concluyen que la interactividad y la personalización en la comunicación son factores determinantes para captar y retener la matrícula en un mercado competitivo.

En síntesis, la convergencia de estos factores la imperativa de sostenibilidad de la 4IR, la reconfiguración post-pandemia, el auge de la IA generativa y predictiva, y la digitalización del comportamiento estudiantil configura un nuevo paradigma de gestión. La literatura analizada evidencia que las instituciones que carecen de sistemas inteligentes para procesar estas variables enfrentan una desventaja estratégica crítica. Por tanto, la optimización de la oferta académica no es un mero ejercicio logístico, sino una respuesta necesaria a un entorno donde la eficiencia administrativa y la satisfacción estudiantil dependen de la capacidad de anticipación algorítmica.



3.2. Modalidades educativas y su impacto en la gestión de recursos

La diversificación de las modalidades educativas ha transformado radicalmente la lógica de la gestión universitaria. Anteriormente, la administración de recursos se limitaba a una asignación lineal de espacios físicos; hoy, la coexistencia de modelos presenciales, virtuales e híbridos impone una matriz de gestión multidimensional. El impacto de esta transformación recae directamente sobre la eficiencia operativa: cada modalidad demanda una configuración específica de tiempo, espacio y tecnología. Ignorar estas diferencias en la planificación estratégica conduce a una subutilización de la infraestructura instalada y a una sobrecarga de los recursos digitales, creando “cuellos de botella” administrativos que frenan la calidad del servicio educativo.

En el análisis del contexto reciente, Iparraguirre Contreras et al. [17] realizaron una revisión sistemática sobre la educación superior pospandemia, identificando que la adopción de modalidades flexibles no fue acompañada de una reestructuración administrativa equivalente. Su estudio determina que la gestión de la educación híbrida requiere “nuevas estrategias de enseñanza-aprendizaje” que impactan la logística institucional. La investigación revela que el intento de gestionar lo híbrido con las mismas reglas administrativas de lo presencial ha generado desorganización. Se concluye que el éxito del modelo no depende solo de la plataforma tecnológica, sino de la capacidad de la institución para reorganizar sus procesos de control y seguimiento académico en un entorno mixto.

Por otro lado, la gestión de recursos debe considerar las disparidades de acceso que cada modalidad exacerba. Pillajo Pila et al. [18] evaluaron el impacto del aprendizaje híbrido en América Latina, destacando que la efectividad de esta modalidad está condicionada por la infraestructura tecnológica del estudiante. Su estudio señala que, sin una gestión que asegure la equidad en el acceso a dispositivos y conectividad, la modalidad híbrida se convierte en un factor de segregación. Esto implica que la planificación de recursos universitarios no puede limitarse al campus; debe considerar si el “recurso virtual” es accesible para la demografía estudiantil, integrando variables socioeconómicas en la matriz de decisión académica.

La complejidad de gestionar múltiples modalidades se hace evidente al cruzar los hallazgos de Iparraguirre Contreras et al. [17] con los de Pillajo Pila et al. [18]. Mientras que el primer estudio [17] advierte sobre la sobrecarga administrativa derivada de la falta de procesos definidos para lo híbrido, el segundo [18] subraya que esta desorganización afecta desproporcionadamente a los estudiantes vulnerables. Ambos coinciden en que la “flexibilidad” prometida por las nuevas modalidades se convierte en ineficiencia operativa si no existe un sistema de gestión robusto. La conclusión conjunta es que la universidad moderna debe transitar de una administración estática a una gestión dinámica que sincronice



los recursos físicos institucionales con las capacidades tecnológicas reales de su población estudiantil.

3.2.1. Educación Presencial, Virtual e Híbrida

La distinción operativa entre las modalidades es fundamental para la planificación. Rodríguez Caballero et al. [19] analizaron los retos específicos del modelo híbrido, diferenciándolo claramente de la educación a distancia tradicional. Según su investigación, la modalidad híbrida no es una suma simple de virtualidad y presencialidad, sino una integración que exige un nuevo perfil docente. El estudio indica que la falta de competencias digitales específicas para este entorno mixto genera ineficiencias; un docente puede ser excelente en lo presencial pero ineficaz gestionando la interacción simultánea virtual. Para la gestión de recursos, esto implica que la asignación de carga horaria debe filtrar al personal no solo por su conocimiento de la materia, sino por su certificación en la modalidad a impartir. En la práctica, la ejecución de estas modalidades presenta fricciones operativas significativas. Guadalupe Beltrán et al. [9] aportaron evidencia empírica del año 2025 sobre la docencia en la Universidad Estatal de Milagro. Su análisis cuantitativo reveló que la modalidad híbrida es percibida por los profesores como la más demandante en términos de carga laboral, requiriendo mayor tiempo de preparación y gestión que la presencialidad pura. Este dato es crítico para la planificación académica: asignar cursos híbridos consecutivos a un mismo docente sin considerar tiempos de transición y soporte técnico incrementa el riesgo de saturación y baja calidad educativa, sugiriendo que los coeficientes de carga horaria deben ponderarse diferente según la modalidad.

La integración de las perspectivas de Rodríguez Caballero et al. [19] y Guadalupe Beltrán et al. [9] permite establecer una jerarquía de complejidad en la gestión de modalidades. Ambos estudios confirman que el modelo híbrido representa el desafío administrativo más alto. Mientras Rodríguez Caballero et al. [19] enfatizan la brecha de formación pedagógica, Guadalupe Beltrán et al. [9] cuantifican el impacto en la carga laboral real. Para efectos de optimización de la oferta académica, esto significa que las modalidades no son variables intercambiables; cada una posee restricciones únicas de capital humano y tiempo que deben ser modeladas explícitamente para evitar la programación de cursos inviables operativa o pedagógicamente.

3.2.2. Requerimientos físicos y tecnológicos por modalidad

La viabilidad de las modalidades presencial e híbrida depende intrínsecamente de las condiciones físicas del aula. Guadalupe Beltrán et al. [9] identificaron una barrera logística determinante: el 45 % de los docentes señaló la “falta de recursos tecnológicos adecuados” en los espacios físicos como el principal obstáculo para la enseñanza híbrida. Este hallazgo demuestra que la infraestructura actual de muchas universidades fue diseñada para



un modelo puramente presencial (pizarra y pupitres) y no soporta los requerimientos de transmisión simultánea (cámaras, audio, red). En términos de gestión, esto obliga a clasificar el inventario de aulas no solo por capacidad de aforo, sino por nivel de equipamiento tecnológico (Hardware readiness).

Frente a estas limitaciones físicas, el paradigma de Smart Campus ofrece una solución de gestión automatizada. Min-Allah y Alrashed [20] proponen que la administración de recursos físicos debe evolucionar hacia sistemas basados en el Internet de las Cosas (IoT). Según su análisis, un campus inteligente utiliza sensores para monitorear la ocupación y el consumo energético en tiempo real, permitiendo una asignación dinámica de espacios. Para la modalidad presencial e híbrida, esto significa pasar de horarios estáticos semestrales a una programación flexible que optimice el uso de laboratorios y aulas inteligentes, reduciendo el desperdicio de capacidad instalada y garantizando que los recursos tecnológicos de alto costo sean asignados a las asignaturas que realmente los requieren.

Finalmente, la gestión de la modalidad virtual e híbrida impone requerimientos severos sobre la arquitectura de datos institucional. Kustitskaya et al. [21] establecen que la toma de decisiones basada en datos (Data-Driven Management) requiere bases de datos educativas diseñadas para capturar la complejidad del proceso de aprendizaje. Su investigación advierte que los sistemas de gestión tradicionales (ERP) suelen estar desconectados de las plataformas de aprendizaje (LMS), creando puntos ciegos sobre la actividad real en los cursos virtuales. Para optimizar la oferta, es imperativo integrar estos flujos de información, permitiendo correlacionar la disponibilidad de infraestructura digital (servidores, licencias de software) con la demanda de cursos virtuales.

3.3. La gestión administrativa en los centros universitarios

La gestión administrativa en las instituciones de educación superior evolucionó desde una función meramente burocrática hacia un eje estratégico de competitividad y sostenibilidad. Anteriormente, la administración se limitaba al registro y control de expedientes; sin embargo, la masificación de la matrícula y la diversificación de modalidades impusieron la necesidad de optimizar procesos mediante la toma de decisiones basada en datos. Se identificó que la eficiencia operativa ya no depende únicamente de la capacidad financiera, sino de la agilidad para gestionar flujos de información complejos que interrelacionan la disponibilidad de infraestructura, la carga docente y la demanda estudiantil, transformando la administración universitaria en una ciencia de optimización de recursos finitos frente a necesidades.

En el análisis de la infraestructura de gestión, Gallegos Macías et al. [8] evaluaron la situación de los Sistemas de Información Estratégica (SIE) en el contexto universitario. Se determinó que, aunque las instituciones invirtieron significativamente en tecnologías de la información, su implementación enfrentó problemáticas estructurales que limitaron su



impacto. Se observó que los sistemas funcionaron predominantemente como herramientas transaccionales para resolver problemas operativos diarios, careciendo de una integración real que permitiera la inteligencia de negocios. La investigación concluyó que la información generada se almacenó en silos, impidiendo a los directivos contar con datos consolidados y oportunos para la planificación a largo plazo, lo que perpetuó modelos de gestión reactivos.

Paralelamente a la problemática tecnológica, la medición del desempeño administrativo presentó desafíos metodológicos. Alvarez-Sánchez et al. [22] realizaron una revisión sistemática sobre la eficiencia en instituciones de educación superior, hallando una heterogeneidad marcada en los modelos de evaluación. Se identificó que la eficiencia administrativa se midió frecuentemente a través de métodos de frontera estocástica y análisis envolvente de datos (DEA), considerando variables como el personal no académico y los gastos operativos como “inputs”. Sin embargo, el estudio reveló que la falta de estandarización en los indicadores de “output” dificultó la comparación y el benchmarking entre universidades, lo que generó una opacidad sobre qué procesos administrativos aportaron valor real a la calidad educativa y cuáles representaron un gasto burocrático ineficiente.

La correlación entre la precariedad de los sistemas de información y la baja eficiencia administrativa se hizo evidente al contrastar los hallazgos de Gallegos Macías et al. [8] y Alvarez-Sánchez et al. [22]. Mientras el primer estudio [8] diagnosticó que la falta de cultura organizacional impidió el uso estratégico de los datos, el segundo [22] confirmó que esta carencia de datos estructurados imposibilitó la construcción de modelos de eficiencia robustos. Ambos autores coincidieron en que la gestión universitaria operó bajo una “ceguera estratégica”, donde los recursos se asignaron por inercia histórica y no por evidencia empírica. Se concluyó que la modernización administrativa requiere transitar de la simple digitalización de procesos a la implementación de sistemas inteligentes que vinculen los indicadores operativos con los objetivos de sostenibilidad financiera.

3.3.1. Impacto Económico de la Planificación Académica

Uno de los procesos críticos donde la ineficiencia administrativa impactó directamente el presupuesto fue la planificación de la matrícula. Shao et al. [6] analizaron la predicción de inscripción de cursos, estableciendo que la inexactitud en los pronósticos constituyó una fuente mayor de costos administrativos innecesarios. Se demostró que subestimar la demanda derivó en la apertura reactiva de secciones de último minuto, mientras que sobreestimarla resultó en la subutilización de espacios y personal docente. El estudio enfatizó que “pronosticar con precisión las tasas de inscripción” es la única vía para minimizar la carga burocrática tanto para estudiantes como para profesores, validando la necesidad de abandonar las.

Para mitigar estos costos, se evaluó la eficacia de diferentes metodologías de predicción.



Shao et al. [6] compararon el rendimiento de análisis de probabilidad condicional frente a algoritmos de aprendizaje automático como Random Forest y árboles de clasificación (CART). Se comprobó que los métodos de Machine Learning superaron a las estadísticas tradicionales al capturar interacciones complejas entre variables demográficas y académicas. Específicamente, el modelo de Random Forest permitió identificar que variables como el “nivel de clase del estudiante” y su “GPA acumulado” fueron determinantes para la inscripción, proporcionando a los administradores una herramienta de “importancia de variables” (variable importance) para refinar sus estrategias de oferta académica con base científica.

La gestión eficiente de la matrícula trascendió la mera logística de cupos para convertirse en un factor de viabilidad operativa. Alvarez-Sánchez et al. [22] señalaron en su revisión que el “personal académico” representa uno de los inputs más costosos en la función de producción universitaria. Por tanto, una planificación deficiente de la oferta académica, basada en predicciones erróneas como las descritas por Shao et al. [6], obligó a las instituciones a mantener una nómina docente ineficiente. Se concluyó que la optimización de los procesos administrativos de inscripción no solo mejoró la experiencia estudiantil, sino que actuó como un mecanismo de control presupuestario, maximizando el retorno de la inversión en capital humano.

3.3.2. Complejidad Logística de la Asignación de Horarios

La materialización final de la gestión académica recae en la programación de horarios, una tarea que se identificó como el cuello de botella operativo más severo. Abdipoor et al. [7] definieron el Problema de Horarios de Cursos Universitarios (UCTP) como un problema de optimización combinatoria de clase NP-Hard. Se estableció que la dificultad administrativa radicó en asignar un conjunto de eventos a espacios y tiempos limitados bajo un gran número de restricciones. La investigación demostró que, a medida que aumentó el tamaño de la institución, el espacio de soluciones creció exponencialmente, haciendo humanamente imposible para los gestores encontrar una solución óptima sin incurrir en conflictos de aulas o docentes mediante métodos manuales.

La complejidad de esta gestión se vio agravada por la evolución de los requerimientos institucionales. Chen et al. [23] realizaron un estudio sobre las tendencias en el UCTP, clasificando las restricciones en “duras” y “blandas”. Se observó que la administración moderna ya no buscó solo satisfacer las restricciones duras (evitar choques de horarios), sino optimizar las blandas, como las preferencias de los profesores y la minimización de ventanas libres para los estudiantes. El estudio destacó que los enfoques administrativos tradicionales fallaron al intentar balancear estos objetivos contrapuestos, validando la necesidad de algoritmos que pudieran ponderar penalizaciones y buscar el bienestar de la comunidad universitaria más allá de la simple factibilidad operativa.

Finalmente, la revisión de la literatura técnica confirmó la obsolescencia de las herramientas de gestión convencionales para este propósito. Chen et al. [23] y Abdipoor et al. [7] coincidieron en que los métodos exactos de programación lineal resultaron computacionalmente costosos e imprácticos para instituciones de gran escala. Abdipoor et al. [7] argumentaron que las metaheurísticas (como algoritmos genéticos o de enjambre) se consolidaron como la única alternativa viable para la administración eficiente. Ambos estudios concluyeron que la gestión administrativa universitaria debe abandonar la pretensión de resolver el cronograma “a mano” o con hojas de cálculo, delegando esta complejidad combinatoria a sistemas inteligentes capaces de explorar el espacio de búsqueda de manera efectiva.



4

Planificación Académica y Distribución de Cargas

Contenido del Capítulo

4.1.	El proceso de programación de la oferta académica	22
4.2.	La Cadencia Académica y el flujo curricular	24
4.2.1.	Importancia de la secuencia de asignaturas	25
4.2.2.	Tiempos y ciclos de matrícula	26
4.3.	Problemáticas en la distribución de secciones	26
4.3.1.	Subestimación de cupos y saturación	28
4.3.2.	Impacto de la mala distribución en el egreso estudiantil	28

4.1. El proceso de programación de la oferta académica

El proceso de programación de la oferta académica se transformó de una tarea administrativa rutinaria a un procedimiento estratégico de alta complejidad. Históricamente, la planificación se ejecutó mediante métodos manuales basados en la repetición de patrones históricos; sin embargo, la masificación de la matrícula y la diversificación curricular exigieron la adopción de modelos dinámicos. Se estableció que la programación eficiente no solo implicó asignar espacios y tiempos, sino sincronizar múltiples variables críticas disponibilidad docente, infraestructura física y demanda estudiantil en un sistema coherente que garantizara la operatividad institucional y la calidad del servicio educativo.

En el contexto de la modernización institucional, Yang [24] exploró la ruta de transformación digital en la gestión educativa universitaria. Su investigación cuantificó el impacto de digitalizar los procesos administrativos, determinando que la implementación de sistemas inteligentes redujo el tiempo dedicado a la gestión en un 30 %. Además, se observó una correlación directa entre la agilidad administrativa y la percepción de calidad; el estudio reportó un incremento del 25 % en la satisfacción estudiantil y una mejora del 20 % en las evaluaciones de calidad educativa. Estos hallazgos validaron que la optimización del proceso de programación no fue meramente una mejora técnica, sino un factor determinante para la eficiencia operativa global de la universidad.

A pesar de las ventajas de la digitalización, se identificó que la persistencia de métodos manuales constituyó la principal barrera para la eficiencia. Farinola y Assogba [25] analizaron la generación de horarios en instituciones de educación superior, señalando que la preparación manual resultó ser un proceso propenso a errores y extremadamente consumidor de tiempo. Se evidenció que los planificadores humanos, al enfrentarse a restricciones conflictivas (como la disponibilidad de aulas versus la preferencia docente), tendieron a producir soluciones subóptimas que requirieron ajustes continuos durante el periodo académico. La investigación concluyó que la automatización mediante inteligencia artificial fue necesaria para eliminar la redundancia y garantizar cronogramas libres de conflictos desde la primera iteración.

Para superar la subjetividad en la planificación, se recurrió a técnicas avanzadas de tratamiento de datos. Almaghrabi et al. [26] presentaron una sistematización del conocimiento (Systematization of Knowledge - SoK) sobre el impacto de la Minería de Datos Educativos (EDM) en la administración organizacional. Se demostró que la aplicación de algoritmos de minería permitió transitar de una gestión basada en la intuición a una basada en evidencia. El estudio destacó que las técnicas de agrupamiento (*clustering*) y predicción facilitaron a los administradores la identificación de patrones ocultos en el comportamiento de matrícula, permitiendo ajustar la oferta académica a las necesidades reales de los estudiantes y optimizar la asignación de recursos antes del inicio del ciclo lectivo.

La operatividad del proceso de programación dependió críticamente de la interconexión



entre plataformas heterogéneas. Pérez-Jorge et al. [27] evaluaron el impacto de las Interfaces de Programación de Aplicaciones (APIs) impulsadas por IA en la gestión de información educativa. Se estableció que la fragmentación de datos entre los Sistemas de Gestión del Aprendizaje (LMS) y los sistemas administrativos (ERP) generó inconsistencias en la oferta académica. La investigación determinó que el uso de APIs inteligentes permitió un flujo de datos en tiempo real, facilitando que la programación de la oferta se alimentara automáticamente de los registros de rendimiento y prerrequisitos estudiantiles, eliminando la necesidad de la captura manual de datos y reduciendo la latencia en la toma de decisiones.

La convergencia de la automatización y la integración de datos generó un impacto multi-dimensional en la institución. Al contrastar los hallazgos de Farinola y Assogba [25] con los de Yang [24], se observó que la implementación de generadores de horarios basados en IA no solo resolvió el problema logístico, sino que mejoró el clima organizacional. Mientras Farinola y Assogba [25] demostraron que la automatización eliminó los conflictos de horarios (choques de aulas o docentes), Yang [24] confirmó que esta eficiencia técnica se tradujo directamente en una mayor satisfacción de los involucrados. Ambos estudios coincidieron en que la tecnología liberó al personal administrativo de tareas repetitivas, permitiéndoles enfocarse en la gestión estratégica y la atención al estudiante.

Sin embargo, se reconoció que la automatización del proceso enfrentó un desafío matemático inherente. Retomando a Abdipoor et al. [7], se reiteró que el Problema de Horarios Universitarios (UCTP) pertenece a la clase de complejidad NP-Hard. En el contexto del proceso de programación, esto significó que buscar la “oferta académica perfecta” implicó explorar un espacio de soluciones que crecía exponencialmente con cada nueva asignatura o sección agregada. Se concluyó que los métodos de programación lineal tradicionales fueron insuficientes para manejar esta explosión combinatoria en tiempos razonables, validando la necesidad de incorporar metaheurísticas en el núcleo del motor de programación para obtener soluciones factibles en tiempos operativos viables.

La evolución del proceso de programación permitió incorporar la sostenibilidad financiera como una variable de control. Almaghrabi et al. [26] destacaron en su revisión que la minería de datos educativos facultó a las instituciones para predecir la asignación de recursos con alta precisión. Se observó que, al analizar los patrones históricos de inscripción y deserción, los algoritmos pudieron sugerir el número óptimo de secciones a abrir, evitando tanto la saturación de aulas como la subutilización de espacios. Esta capacidad predictiva transformó la programación de la oferta de un ejercicio reactivo a uno proactivo, alineando la disponibilidad académica con las restricciones presupuestarias y de infraestructura de la universidad.

Asimismo, el proceso de programación evolucionó hacia un enfoque centrado en el usuario final. Pérez-Jorge et al. [27] argumentaron que la gestión de información impulsada por

IA permitió personalizar la experiencia educativa. Se determinó que, mediante el análisis de las trayectorias académicas individuales accesibles a través de APIs, el sistema de programación pudo priorizar la apertura de asignaturas críticas para el egreso de cohortes específicas. Esto aseguró que la oferta académica no fuera estática, sino que se adaptara dinámicamente a las necesidades de avance curricular de los estudiantes, reduciendo los tiempos de graduación y mejorando los indicadores de eficiencia terminal.

En conclusión, la reingeniería del proceso de programación de la oferta académica se fundamentó en la integración de tres pilares tecnológicos: la minería de datos para la predicción de la demanda, las APIs para la interoperabilidad de sistemas y los algoritmos metaheurísticos para la resolución de conflictos. La evidencia analizada confirmó que la transición hacia este modelo automatizado fue indispensable para gestionar la complejidad de la educación superior moderna. Se estableció que solo mediante esta simbiosis tecnológica fue posible garantizar una oferta académica que fuera simultáneamente eficiente en costos, viable logísticamente y pertinente para las necesidades estudiantiles.

4.2. La Cadencia Académica y el flujo curricular

La cadencia académica se definió no solo como la cronología de los períodos lectivos, sino como la velocidad y fluidez con la que el estudiantado transitó a través de la malla curricular. Se identificó que el flujo curricular no fue un proceso lineal uniforme, sino un sistema dinámico propenso a interrupciones causadas por la falta de sincronización entre la oferta institucional y el avance real de los estudiantes. El análisis de esta variable fue determinante, pues se estableció que cualquier desajuste en la programación de asignaturas críticas generó un “efecto dominó”, alterando los tiempos de egreso y provocando la acumulación de matrícula en niveles inferiores, lo que saturó la capacidad operativa de la universidad. Para comprender la estructura subyacente de este flujo, se retomó el enfoque de Stavrinides y Zuev [11], quienes modelaron los planes de estudio mediante Redes de Prerrequisitos de Cursos (CPNs). Se analizó la malla curricular no como un listado, sino como un grafo dirigido acíclico donde los nodos representaron las asignaturas y los enlaces sus dependencias. La investigación determinó que la complejidad del flujo curricular residió en la “centralidad” de ciertos nodos; se demostró que ignorar la topología de la red al programar la oferta académica provocó bloqueos estructurales, impidiendo que los estudiantes avanzaran a pesar de tener cupos disponibles en materias no correlativas.

La gestión eficiente de este flujo requirió una infraestructura de datos robusta capaz de almacenar la trazabilidad histórica del estudiante. Amo et al. [28] propusieron una arquitectura de Almacén de Datos Educativos (EDW) modular y basada en la nube para centralizar esta información dispersa. Se implementó un diseño que permitió la integración de datos provenientes de Sistemas de Gestión del Aprendizaje (LMS) y sistemas administrativos, facilitando el análisis de grandes volúmenes de datos (Big Data). El estudio concluyó



que contar con un repositorio unificado y seguro fue el prerequisito técnico indispensable para aplicar algoritmos de análisis sobre el progreso curricular, garantizando que la toma de decisiones se basara en la realidad histórica de los expedientes y no en proyecciones teóricas.

Complementariamente, se abordó la predicción del comportamiento estudiantil dentro de este flujo. Almalawi et al. [29] realizaron una revisión sistemática de modelos predictivos con fines educativos, identificando que el aprendizaje automático supervisado fue la técnica más eficaz para anticipar el rendimiento y la deserción. Se observó que los modelos predictivos permitieron identificar patrones de riesgo en etapas tempranas del flujo curricular, alertando a los gestores sobre qué estudiantes tenían alta probabilidad de reprobar o abandonar. Esta capacidad de anticipación fue clave para la planificación académica, pues permitió ajustar la oferta de cursos remediales o tutorías antes de que el flujo se interrumpiera definitivamente.

4.2.1. Importancia de la secuencia de asignaturas

La secuencia de asignaturas se identificó como la columna vertebral de la planificación académica, regida por una jerarquía estricta. Stavrinides y Zuev [11] introdujeron el concepto de “estratificación topológica” para clasificar las asignaturas según su nivel de profundidad y dependencia. Se determinó que violar esta secuencia natural por ejemplo, ofertar cupos en materias avanzadas sin garantizar la cobertura suficiente en sus prerequisitos generó inconsistencias académicas. El análisis de la red curricular reveló que ciertas asignaturas actuaron como “cuellos de botella” estructurales; su reprobación o falta de oferta detuvo el avance de cohortes enteras, validando la necesidad de priorizar estos cursos en la asignación de recursos.

La secuencia óptima no dependió únicamente de los prerequisitos formales, sino también de la carga cognitiva y la dificultad inherente de las materias. Bhosale y Hore [30] desarrollaron un motor de programación académica basado en IA que consideró la “asignación inteligente del tiempo de estudio”. Su modelo integró heurísticas para equilibrar la carga de trabajo, evitando que la secuencia sugerida al estudiante combinara múltiples asignaturas de alta complejidad en un mismo ciclo. Se demostró que respetar una secuencia balanceada mejoró el rendimiento académico, ya que el motor ajustó la progresión curricular a la capacidad real de absorción de conocimientos del estudiante, en lugar de forzar un avance administrativo rígido.

La interrelación entre la estructura secuencial del currículo y el riesgo de fracaso escolar fue validada al cruzar los hallazgos de Stavrinides y Zuev [11] con los de Almalawi et al. [29]. Mientras que el análisis topológico de Stavrinides y Zuev [11] permitió identificar qué asignaturas eran críticas para mantener la conectividad del grafo curricular, los modelos predictivos revisados por Almalawi et al. [29] cuantificaron la probabilidad de que

un estudiante fallara en dichos nodos críticos basándose en su historial. Ambos estudios coincidieron en que la gestión de la oferta académica debió focalizarse en los puntos de intersección entre la alta complejidad estructural y el alto riesgo predictivo, asegurando que la secuencia de asignaturas no se convirtiera en un filtro excluyente sino en un camino transitable.

4.2.2. Tiempos y ciclos de matrícula

Los tiempos de matrícula y la duración de los ciclos académicos dejaron de ser variables estáticas para adaptarse a las necesidades del estudiante moderno. Bhosale y Hore [30] propusieron un enfoque de planificación centrado en la gestión del tiempo personal, donde el sistema generó horarios de estudio y sugerencias de matrícula basándose en la disponibilidad real del usuario. Se implementó un algoritmo que utilizó el almacenamiento local y reglas heurísticas para crear planes de estudio dinámicos. Este enfoque evidenció que alinear los ciclos de matrícula con la disponibilidad temporal del estudiante redujo la ansiedad y mejoró la tasa de finalización de cursos, contrastando con los modelos tradicionales de asignación de bloques horarios inflexibles.

La gestión de los ciclos de matrícula implicó el procesamiento masivo de información sensible en ventanas de tiempo críticas. Amo et al. [28] enfatizaron la importancia de la privacidad y la seguridad en la arquitectura del almacén de datos durante estos períodos de alta demanda. Se diseñó un sistema que incorporó técnicas de anonimización y encriptación para proteger la identidad estudiantil mientras se analizaban sus patrones de inscripción. El estudio determinó que garantizar la integridad y confidencialidad de los datos durante el ciclo de matrícula fue fundamental para mantener la confianza institucional y cumplir con las normativas éticas de la minería de datos educativos.

Finalmente, la definición de los tiempos de oferta requirió un balance entre la demanda predicha y la capacidad instalada. Retomando la revisión de Almalawi et al. [29], se destacó el uso de algoritmos de optimización para ajustar los horarios de clase a las preferencias temporales detectadas en los datos históricos. Se observó que los modelos predictivos no solo anticiparon qué materias cursarían los estudiantes, sino en qué franjas horarias tendrían mayor probabilidad de éxito y asistencia. La integración de estas predicciones temporales en la programación oficial permitió a la institución maximizar el uso de sus instalaciones durante los ciclos de matrícula, distribuyendo la carga de manera uniforme y evitando la saturación en horas pico.

4.3. Problemáticas en la distribución de secciones

La distribución de secciones se identificó como el punto crítico donde la planificación estratégica convergió con la realidad operativa. Una vez definida la oferta académica macro,



el desafío administrativo consistió en determinar la cantidad exacta de paralelos (grupos) necesarios para cada asignatura. Se observó que este proceso fue vulnerable a sesgos históricos; la repetición inercial de la programación de años anteriores, sin considerar las variaciones estocásticas de la demanda actual, derivó frecuentemente en desequilibrios estructurales. La ineficiencia en esta etapa no solo generó conflictos logísticos, sino que comprometió la calidad educativa al forzar la apertura de cursos sobre poblados o, inversamente, diluir los recursos docentes en secciones con baja rentabilidad social.

En el intento de racionalizar esta distribución, Pauta Riera et al. [31] realizaron un estudio comparativo en la Universidad Católica de Cuenca sobre el uso de modelos de regresión para pronosticar la demanda estudiantil. Se aplicaron modelos lineales, logarítmicos y polinómicos para predecir la matrícula en carreras de ingeniería. La investigación determinó que, si bien los modelos estadísticos clásicos ofrecieron una aproximación inicial, los modelos lineales tendieron a simplificar excesivamente el comportamiento de la matrícula, presentando coeficientes de determinación (R^2) inferiores a los modelos polinómicos (0,96). Se concluyó que confiar exclusivamente en proyecciones lineales para la distribución de secciones condujo a errores de subestimación en períodos de crecimiento acelerado, resultando en una falta de cobertura para la demanda real.

La inexactitud en la predicción de la cantidad de estudiantes tuvo repercusiones directas en la eficiencia administrativa. Retomando a Shao et al. [6], se estableció que la incapacidad para pronosticar las tasas de inscripción con precisión generó costos operativos innecesarios y una carga administrativa adicional. Se evidenció que cuando la distribución de secciones se basó en estimaciones incorrectas, la administración se vio obligada a realizar ajustes reactivos de “último minuto”, como la contratación emergente de docentes o la reasignación forzada de aulas. El estudio enfatizó que minimizar el error de predicción fue fundamental para asignar los recursos apropiados asientos, espacio de laboratorio y auxiliares antes del inicio del ciclo, evitando la improvisación logística.

Finalmente, la problemática de distribución trascendió lo administrativo para afectar la permanencia estudiantil. Shilbayeh y Abonamah [12] desarrollaron modelos predictivos para identificar patrones de deserción vinculados al comportamiento de inscripción. Su investigación demostró que las dificultades en el proceso de matrícula, derivadas de una oferta inadecuada, actuaron como factores de riesgo para la deserción (*attrition*). Se observó que los estudiantes que enfrentaron barreras para inscribir las asignaturas de su elección presentaron una mayor probabilidad de abandono. Por tanto, se determinó que la distribución de secciones no debió tratarse como un mero ejercicio numérico, sino como una estrategia de retención institucional que requirió intervención proactiva basada en el análisis de riesgo de cada perfil estudiantil.



4.3.1. Subestimación de cupos y saturación

La subestimación de la demanda real en la planificación de cupos derivó en el fenómeno de “saturación áulica”. Pauta Riera et al. [31] evidenciaron que la falta de herramientas predictivas robustas provocó que la infraestructura física se viera rebasada por la matrícula efectiva. En su análisis de la Unidad Académica de Ingeniería, se detectó que la discrepancia entre las plazas ofertadas (basadas en históricos estáticos) y la demanda real generó sobre población en las aulas. Esta saturación no solo contravino las normas pedagógicas de ratio estudiante/docente, sino que obligó a la institución a improvisar desdobles de grupos sin la planificación de infraestructura adecuada, comprometiendo la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Para corregir esta subestimación, fue necesario identificar qué variables determinaban realmente la ocupación de un curso. Shao et al. [6] aplicaron métricas de “importancia de variables” (*variable importance*) derivadas de algoritmos de Random Forest, descubriendo factores que los métodos tradicionales ignoraban. Se determinó que variables como la “especialidad del estudiante” (*major*) y su “nivel de clase” (*freshman, sophomore, etc.*) tuvieron un peso predictivo superior al historial simple de inscripciones pasadas. El estudio concluyó que la subestimación de cupos ocurrió frecuentemente porque los planificadores humanos no lograron ponderar las interacciones no lineales entre estas variables demográficas y académicas, asumiendo erróneamente una demanda homogénea.

La superioridad de los enfoques avanzados para mitigar la saturación se confirmó al contrastar los resultados de Pauta Riera et al. [31] con los de Shao et al. [6]. Mientras que Pauta Riera et al. [31] lograron mejorar el ajuste de la oferta mediante modelos de regresión polinómica ($R^2 \approx 0,96$), Shao et al. [6] demostraron que los métodos de aprendizaje automático (Random Forest) redujeron aún más el error cuadrático medio (RMSE) al manejar datos complejos y ruidosos. Ambos estudios coincidieron en que la planificación manual o basada en promedios simples fue sistemáticamente deficiente para anticipar picos de demanda. Se estableció que la única vía para evitar la subestimación de cupos y la consecuente saturación fue la adopción de modelos matemáticos no lineales capaces de simular el comportamiento de inscripción con alta fidelidad.

4.3.2. Impacto de la mala distribución en el egreso estudiantil

La correlación entre la disponibilidad de cursos y la deserción universitaria se analizó sistemáticamente en la literatura reciente. Quimiz-Moreira et al. [32] realizaron una revisión sistemática (2012-2024) sobre los factores de deserción universitaria, clasificándolos en dimensiones individuales, académicas e institucionales. Se identificó que, dentro de los factores institucionales, la gestión ineficiente de la oferta académica jugó un rol preponderante. El estudio reveló que la incapacidad de la institución para proveer una ruta curricular fluida debido a la mala distribución de secciones o horarios conflictivos actuó como un



detonante para el abandono, especialmente en estudiantes que ya presentaban vulnerabilidad académica. Se concluyó que la predicción de la deserción debió integrar variables de gestión institucional y no culpar únicamente al rendimiento del estudiante.

Más allá de los factores macro, la experiencia diaria del estudiante con los servicios universitarios resultó ser un predictor crítico. Matz et al. [33] investigaron la retención estudiantil integrando datos de nivel “meso”, que capturaron la interacción del estudiante con el entorno universitario a través de aplicaciones móviles y sistemas. Se descubrió que la falta de compromiso (*engagement*) con los servicios institucionales que incluye la frustración al interactuar con sistemas de matrícula inefficientes fue una señal temprana de alerta. El modelo de Random Forest utilizado demostró que combinar datos demográficos con métricas de comportamiento (como la frecuencia de uso de la app universitaria) mejoró significativamente la predicción de la retención. Esto sugirió que una distribución de secciones que dificulte la “vida digital” y administrativa del estudiante erosiona su sentido de pertenencia y precipita su salida.

Finalmente, se estableció la necesidad de utilizar la distribución de secciones como una herramienta de intervención preventiva. Shilbayeh y Abonamah [12] propusieron un enfoque donde la identificación de estudiantes en riesgo de deserción informara la planificación académica. Al utilizar algoritmos para clasificar a los estudiantes según su probabilidad de abandono, la institución pudo priorizar la asignación de cupos en secciones críticas para estos perfiles vulnerables. Se determinó que una distribución “inteligente” no solo buscó llenar aulas, sino garantizar que los estudiantes con mayor riesgo de *attrition* tuvieran acceso garantizado a los cursos necesarios para mantener su progreso, transformando la gestión de horarios en un mecanismo activo de retención y éxito estudiantil.



5

Tecnologías para la movilidad inteligente

Contenido del Capítulo

5.1. Evolución de los sistemas de transporte inteligente (ITS)	31
5.1.1. Orígenes y primeros desarrollos	31
5.1.2. Comunicación Vehicular	31
5.1.3. Control Adaptativo y métodos basados en inteligencia artificial	32
5.1.4. Tecnologías emergentes y comunicación no tradicional	32
5.2. Herramientas tecnológicas aplicadas al control del tráfico	33

5.1. Evolución de los sistemas de transporte inteligente (ITS)

Los Sistemas de Transporte Inteligente, Intelligent Transportation System (ITS) consiste en aplicar Tecnologías de la Información Tecnologías de la Información (TI) incluyendo telecomunicaciones, sensores y automatización al sector del transporte y la movilidad. El objetivo principal es mejorar la eficiencia operativa, la seguridad vial, la gestión del tráfico y, fundamentalmente, optimizar la experiencia del usuario. Son un enfoque que busca mejorar la eficiencia del transporte a través de la aplicación de tecnología [34]. Los ITS no representan una innovación repentina, sino el resultado de un proceso evolutivo y gradual. Su desarrollo ha sido impulsado por avances continuos en cuatro áreas tecnológicas clave: la mejora de las comunicaciones, que facilita el intercambio de datos en tiempo real; el progreso en la automatización de vehículos e infraestructuras; el crecimiento exponencial en la capacidad de procesamiento de información; y la creciente sofisticación de los modelos y arquitecturas de datos que optimizan la gestión de la movilidad urbana.

5.1.1. Orígenes y primeros desarrollos

En sus inicios, la gestión de tráfico se caracterizaba por sistemas de señalización estática. Estos operaban con tiempos de ciclo preprogramados o fijos, basándose estrictamente en horarios establecidos y modelos históricos, y sin capacidad de ajuste en tiempo real al volumen o a la demanda real del flujo vehicular. Hay revisiones históricas que describen cómo los ITS emergieron gradualmente desde sistemas simples de semáforos y control básico.

5.1.2. Comunicación Vehicular

La comunicación entre los vehículos y con la infraestructura vial ha adquirido una importancia fundamental en los ITS más recientes, gracias a la implementación de las Redes Vehiculares Ad hoc, Vehicular Ad hoc Networks (VANETs). En las VANETs, los vehículos funcionan como puntos de conexión que están constantemente compartiendo y reuniendo datos. Esto permite ofrecer servicios de transporte novedosos, tales como la administración del tráfico, la asistencia en la navegación, la conducción sin intervención humana y la emisión de avisos o alarmas [35]. La conectividad vehicular se define como la capacidad de un vehículo para establecer comunicación directa con otros vehículos Vehículo a Vehículo, Vehicle to Vehicle (V2V) o con la infraestructura vial Vehículo a Infraestructura, Vehicle to Infrastructure (V2I). Esta capacidad permite el intercambio de datos en tiempo real. Si bien el objetivo final de esta tecnología es lograr una cobertura de red completa donde teóricamente "todos los vehículos que viajan por la carretera estén conectados", la conectividad es la habilidad intrínseca para iniciar y mantener dichas comunicaciones [36]. De igual forma, según [37], el cual describe cómo Redes Definidas por Software, SoftwareDefined



Networking (SDN) están siendo incorporadas para mejorar la gestión y coordinación de redes vehiculares, mejor seguridad y flexibilidad en ITS. Las cuales se percibe como una solución moderna y fundamental para superar las limitaciones de las redes vehiculares heterogéneas, dinámicas y a gran escala como VANETs e Internet de los Vehículos, Internet of Vehicles (IoV), al ofrecer control centralizado, programabilidad y eficiencia mejorada.

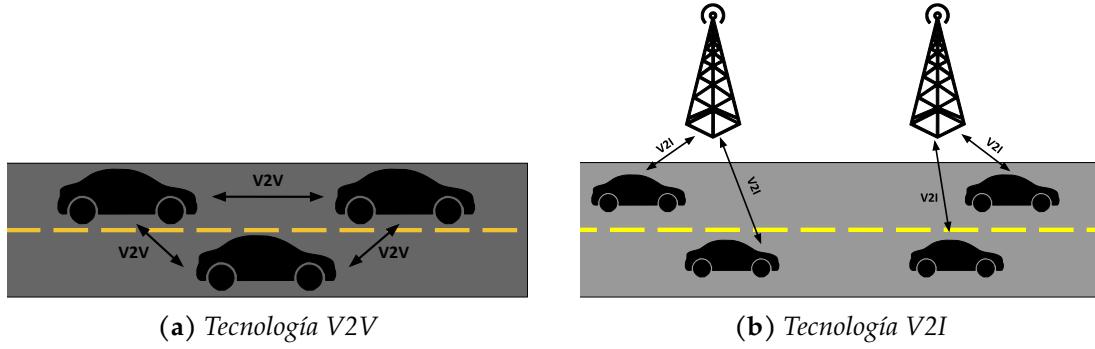


Figura 5.1: Tecnologías de comunicación vehicular V2V y V2I.

5.1.3. Control Adaptativo y métodos basados en inteligencia artificial

La creciente accesibilidad a los datos en tiempo real está impulsando la difusión de los sistemas adaptativos. Estos autores proponen [38] una estrategia llamada SD3-Light con el fin de solucionar la congestión vehicular. Esta táctica se basa en el control en tiempo real de los semáforos, lo que implica ajustar dinámicamente sus fases y la duración de las mismas. Este trabajo de investigación utiliza específicamente el Aprendizaje por Refuerzo, Reinforcement Learning (RL) como su enfoque principal. Adicionalmente, el uso del aprendizaje profundo para pronosticar el flujo de vehículos hace posible prever y reaccionar a los cambios bruscos en las condiciones del tráfico. El autor [39] propone un enfoque innovador para la Predicción del Flujo de Tráfico, Traffic Flow Prediction (TFP) urbano utilizando Big Data y Aprendizaje Profundo, Deep Learning (DL), con el objetivo de mejorar la precisión y apoyar el desarrollo urbano sostenible

5.1.4. Tecnologías emergentes y comunicación no tradicional

Los ITS más recientes utilizan el Big Data y modelos de predicción debido a la enorme cantidad de datos recopilados por sensores, dispositivos móviles y vehículos interconectados. Esto les permite prever dónde habrá atascos, mejorar las rutas y adaptar la planificación. También, surgen tecnologías poco convencionales, un ejemplo es la que propone [40] un sistema que emplea luces LED en vehículos e infraestructura (V2V, V2I) para la



comunicación bidireccional, permitiendo la localización precisa de los vehículos y la recopilación de datos detallados sobre el tráfico, concluyendo su trabajo con que el control de tráfico adaptativo utilizando la tecnología Comunicación por Luz Visible entre Vehículos, Vehicle-to-Vehicle Visible Light Communication (V-VLC) es una tecnología prometedora para permitir una comunicación confiable y eficiente en entornos de vehículos conectados y tiene una promesa significativa para mejorar el flujo de tráfico

5.2. Herramientas tecnológicas aplicadas al control del tráfico

Los ITS más recientes utilizan el Big Data y modelos de predicción debido a la enorme cantidad de datos recopilados por sensores, dispositivos móviles y vehículos interconectados. Esto les permite prever dónde habrá atascos, mejorar las rutas y adaptar la planificación.

- **Sistemas de control adaptativo basados en sensores y localización de detectores:** Instalar sistemas de control adaptativo es una de las tácticas más efectivas para mejorar la administración del tráfico en los cruces. Estos sistemas pueden alterar los tiempos de los semáforos en tiempo real, basándose en los datos exactos que proveen los sensores de detección ubicados estratégicamente. De esta manera [41], analiza el problema del tráfico denso en las ciudades y sugiere que los Sistemas de Control Adaptativo de Señales de Tráfico, Adaptive Traffic Signal Control (ATSC) son la solución propuesta para enfrentarlo y concluye cómo es esencial el uso de algoritmos Aprendizaje por Refuerzo, Reinforcement Learning (RL) para lograr que los sistemas de semáforos puedan reaccionar de forma dinámica y se ajusten a los patrones de tráfico en constante variación. Asimismo, [42] propone un método de control de señales de tráfico adaptativo y de bajo costo diseñado para reducir la congestión en las intersecciones, especialmente en regiones con presupuestos limitados, logrando demostrar que el método propuesto logra una reducción significativa en el retraso total del tráfico en intersecciones con ratios de volumen a capacidad tanto bajos como altos.
- **Algoritmos de aprendizaje automático / aprendizaje reforzado (Reinforcement Learning) y control basado en datos históricos:** Retomando el punto anterior sobre RL, los algoritmos que usan aprendizaje automático (particularmente aprendizaje reforzado) junto con características del estado real del tráfico (colas, flujos, etc.) permiten optimizar secuencias semafóricas de forma más eficiente frente a métodos estáticos o basados en reglas simples. En donde hablábamos sobre el trabajo hecho por [38].
- **Visión por computadora y sensores visuales para priorización de vehículos de emergencia:** Una tecnología esencial para identificar a los vehículos de emergencia (camiones de bomberos o ambulancias) y asignarles automáticamente preferencia

en los semáforos es la visión artificial. La finalidad principal de esta acción es disminuir notablemente los plazos de respuesta, así como, disminuir el riesgo de que se pierdan vidas. Así como, [43] propone un sistema que utiliza sensores visuales en las intersecciones para medir la distancia de los vehículos de emergencia y contar el tráfico circundante, empleando la distancia euclídea como la técnica más precisa. Beneficiando de esta forma a la población dado el profundo y significativo impacto social que generan los eventos de emergencia.

- **Frameworks y simulaciones para comparar controladores adaptativos:** el hecho de que estas herramientas permiten experimentar con varias estrategias para gestionar el tráfico las hace esenciales. Lo más relevante es que, al evitar la necesidad de instalar estos sistemas complejos físicamente en la infraestructura vial, los costes de implementación y prueba se reducen considerablemente. Paralelamente, [44] expone un marco de código abierto para la creación y análisis de diferentes modelos de control adaptativo de semáforos en simulaciones. Este marco aplica enfoques tradicionales para el control del tráfico, como los modelos de Webster, Max-pressure y Semáforos Autoorganizables, Self-Organizing Traffic Lights (SOTL). Se ha logrado demostrar que estos marcos incrementan la eficiencia en cuanto a tiempos de viaje y demoras.
- **Priorización de tráfico de emergencia y sistemas dinámicos:** además de la detección visual, hay estudios que sugieren sistemas integrales que aseguran la prioridad de tránsito para los vehículos de emergencia. Estos sistemas cumplen su propósito al modificar de manera dinámica las señales de tráfico, llegando a ajustar incluso todo el ciclo semafórico de un cruce con base en la detección en tiempo real de la cercanía de esos vehículos [45].



6

Teoría de Grafos

Contenido del Capítulo

6.1. Conceptos principales de teoría de grafos	36
6.1.1. Definición de grafo	36
6.1.2. Nodos	36
6.1.3. Grafos dirigidos y no dirigidos	37
6.1.4. Grafos ponderados (Pesos y Costos)	37
6.2. Propiedades relevantes en redes de tráfico	38
6.2.1. Grados de los nodos (entradas/salidas)	38
6.2.2. Caminos y rutas	38
6.2.3. Grafos Conexos	39
6.2.4. Subgrafos relevantes	39
6.3. Algoritmos aplicados al análisis vial	40
6.3.1. Algoritmos de camino (Dijkstra y A*)	40
6.3.2. Algoritmo de flujo máximo (FordFulkerson)	42
6.3.3. Análisis de centralidad	43
6.4. Detección de nodos críticos y vulnerabilidad de la red	45
6.5. Simulación del tráfico vehicular con grafos	46
6.6. Retos y limitaciones de la teoría de grafos en la movilidad urbana	48

6.1. Conceptos principales de teoría de grafos

La teoría de **grafos** se ha consolidado como una herramienta formal esencial para representar y analizar sistemas compuestos por elementos interconectados. Su mayor fortaleza es la capacidad de abstraer fenómenos reales como redes viales, sistemas de transporte, redes sociales o estructuras computacionales en modelos matemáticos simples pero muy poderosos, permitiendo estudiar su comportamiento, detectar patrones y proponer optimizaciones basadas en su estructura. Este enfoque ha sido ampliamente validado en la literatura científica, donde los grafos se utilizan para estudiar desde redes biológicas hasta infraestructura urbana.

6.1.1. Definición de grafo

Un grafo se define formalmente como un par ordenado $G = (V, E)$ donde V es el conjunto de vértices o nodos, y E es el conjunto de aristas que representan las conexiones entre ellos [46], [47]. Esta representación permite capturar la estructura subyacente de una red real, como por ejemplo una red de transporte urbano. Esta capacidad de representar intersecciones como nodos y vías como aristas lo convierte en un modelo idóneo para analizar el tráfico vehicular. En la literatura reciente aplicada a ITS, el grafo es la estructura de datos subyacente que permite representar desde la topología física de la ciudad hasta las dinámicas complejas de interacción vehicular [48], [49].

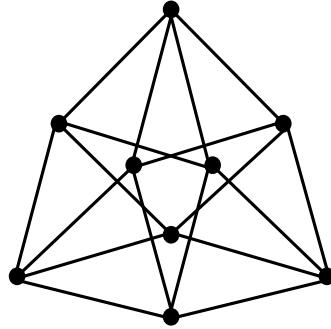


Figura 6.1: Representación gráfica de un grafo simple. Fuente: Basado en el libro “Teoría de Grafos Moderna” [46].

6.1.2. Nodos

En el contexto del modelado vial, los nodos $v \in V$ representan puntos discretos de decisión o transferencia en el espacio. Dependiendo de la granularidad del modelo (macro o microscópico), un nodo puede simbolizar:



- **Intersecciones físicas:** Cruces semaforizados, señales de alto o rotondas donde los flujos vehiculares convergen y divergen.
- **Centroides de demanda:** En modelos de planificación, los nodos actúan como fuentes (origen) y sumideros (destino) de viajes, representando zonas residenciales o comerciales.
- **Puntos de transferencia:** Estaciones de transporte público o terminales logísticas.

Como destacan [50], la correcta definición de los atributos del nodo (como capacidad de procesamiento o penalización por giro) es crítica para detectar cuellos de botella estructurales.

6.1.3. Grafos dirigidos y no dirigidos

La direccionalidad es una propiedad esencial para la validez del modelo de tráfico:

- **Grafos no dirigidos:** Asumen que la conexión entre nodos es simétrica (el costo de ir de A a B es igual que de B a A). Son poco frecuentes en modelos urbanos realistas, ya que ignoran el sentido de las vías.
- **Grafos dirigidos (Dígrafos):** Son el estándar en la modelización de transporte. Aquí, cada arco tiene un sentido específico. Esto permite representar:
 - Calles de sentido único.
 - Restricciones de giro en intersecciones.
 - Fenómenos asimétricos (ej. una pendiente que reduce la velocidad en un sentido, pero no en el otro).

Según [51], el uso de grafos dirigidos es indispensable para la implementación de algoritmos de control de tráfico, ya que previene la asignación de rutas imposibles físicamente.

6.1.4. Grafos ponderados (Pesos y Costos)

Un grafo puramente topológico indica conectividad, pero para analizar eficiencia se requiere un **grafo ponderado**. En este modelo, a cada arco se le asigna un valor numérico o "peso" (w), que representa el costo generalizado de atravesarlo. En tu tesis, los pesos pueden definirse bajo diferentes métricas, transformando la naturaleza del análisis:

- **Peso basado en Distancia (d):** Útil para rutas estáticas y planificación de infraestructura física.
- **Peso basado en Tiempo (t):** Es dinámico y depende de la congestión.
- **Peso basado en Congestión/Capacidad:** Utiliza funciones de impedancia (como la función BPR) donde el peso aumenta exponencialmente a medida que el volumen de tráfico se acerca a la capacidad de la vía.



Estudios recientes utilizan grafos ponderados dinámicamente para predecir demoras, donde los pesos se actualizan en tiempo real mediante Redes Neuronales Gráficas, Graph Neural Networks (GNN) [48].

6.2. Propiedades relevantes en redes de tráfico

La comprensión de las propiedades estructurales de una red vial es fundamental para analizar el comportamiento del tráfico urbano mediante teoría de grafos. Uno de los principales beneficios de este enfoque radica en que permite abstraer la compleja interacción entre calles e intersecciones en un modelo matemático manejable, lo que a su vez facilita identificar puntos críticos, evaluar rutas y comprender los patrones de movilidad con un nivel de precisión difícil de lograr mediante observación intuitiva. La Teoría de Grafos permite relacionar una estructura abstracta y simple de nodos interconectados, la ventaja de este enfoque radica en la simplicidad para calcular un conjunto de índices que evalúan la conectividad, accesibilidad y centralidad dentro de las redes [52].

6.2.1. Grados de los nodos (entradas/salidas)

El **grado nodal**, que se define como la cantidad de aristas que inciden en un vértice, es la métrica más fundamental pero también informativa. En el marco de grafos dirigidos, esta característica se separa en dos: grado de entrada y grado de salida. De acuerdo con investigaciones actuales sobre la vulnerabilidad de las redes, los nodos que tienen un gran grado de entrada funcionan como desagües de flujo, constituyendo lugares donde se concentran flujos vehiculares y donde la posibilidad de congestión es alta. Según [53], el análisis del grado permite descubrir jerarquías naturales en el diseño urbano, lo que hace visibles patrones que no siempre son obvios en los mapas convencionales.

Identificar nodos de alto y bajo grado no solo brinda una perspectiva estructural, sino que también hace más fácil la priorización de intervenciones. Las intersecciones con un alto grado suelen ser candidatas para la ampliación de carriles, la implementación de rotondas o mejoras en los semáforos. En cambio, si se integran de manera apropiada, los nodos de bajo grado pueden actuar como rutas de alivio. Esto pone de manifiesto que el grado no es solo una propiedad matemática, sino también un instrumento eficaz para diagnosticar cómo se comporta el tráfico.

6.2.2. Caminos y rutas

La idea de la conectividad entre dos puntos se establece a través del concepto de **camino**, que es una sucesión limitada de aristas que conecta un nodo inicial con uno final sin repetir vértices. Es fundamental diferenciar entre la viabilidad operativa y la existencia topológica de un camino en ingeniería de transporte. Un camino topológico simplemente señala que



se puede ir de A a B, mientras que una ruta operativa en un grafo ponderado intenta optimizar una función de costo, normalmente la distancia generalizada o el tiempo de viaje. La redundancia de vías (la presencia de varias rutas independientes entre pares origen-destino) es un indicador directo de la capacidad de recuperación de la red; si una ruta principal se ve afectada por un incidente, contar con caminos alternativos permite que el sistema pueda asimilar la interrupción sin llegar a un colapso [54]. De acuerdo con [55], el análisis de las vías revela la estructura de accesibilidad en una ciudad, permitiendo evaluar la eficacia y el efecto del diseño vial sobre la movilidad diaria. Esto permite que se puedan analizar rutas críticas, evaluar la fortaleza del sistema frente a bloqueos y sugerir redistribuciones de tráfico que disminuyan la presión sobre las principales vías.

6.2.3. Grafos Conexos

Según [56], un grafo se considera conexo si es posible alcanzar cualquier nodo desde otro cualquiera a través de un camino. De lo contrario, no es conexo, pero puede descomponerse en componentes conexas, que son subconjuntos de los nodos y las aristas del grafo original que sí presentan conexión. En el contexto del tráfico urbano, esta propiedad es fundamental porque determina la cohesión de la red: una red vial altamente conexa ofrece múltiples rutas alternativas, lo que disminuye la probabilidad de congestión severa cuando ocurre un bloqueo o incidente. La conectividad es un indicador clave de la resiliencia de la red urbana. Esta propiedad también permite identificar componentes aislados o subredes mal integradas que pueden obstaculizar la fluidez vehicular y requerir mejoras en infraestructura.

6.2.4. Subgrafos relevantes

La estructura de la red se puede estudiar a través de subgrafos o agrupaciones densas, además de los nodos individuales. Las comunidades son subconjuntos de nodos que muestran una densidad interna de conexiones notablemente más alta que la de sus conexiones con el resto de la red. En investigaciones de tráfico, trabajar con subgrafos es particularmente beneficioso porque simplifica el análisis de corredores viales, áreas comerciales, zonas escolares o sectores con un gran volumen de vehículos sin sacrificar la claridad analítica. La estructura de la red se puede estudiar a través de subgrafos o agrupaciones densas, además de los nodos individuales. Las comunidades son subconjuntos de nodos que muestran una densidad interna de conexiones notablemente más alta que la de sus conexiones con el resto de la red. En investigaciones de tráfico, trabajar con subgrafos es particularmente beneficioso porque simplifica el análisis de corredores viales, áreas comerciales, zonas escolares o sectores con un gran volumen de vehículos sin sacrificar la claridad analítica. Según [57], el estudio de subgrafos posibilita analizar patrones locales en la estructura más extensa de la red urbana, lo que ofrece información minuciosa acerca de la densidad vial,



el nivel de redundancia y la eficacia interna de áreas concretas. Esto permite identificar áreas vulnerables, sugerir rutas de desahogo o planear modificaciones en los semáforos y la señalización dentro de zonas específicas.

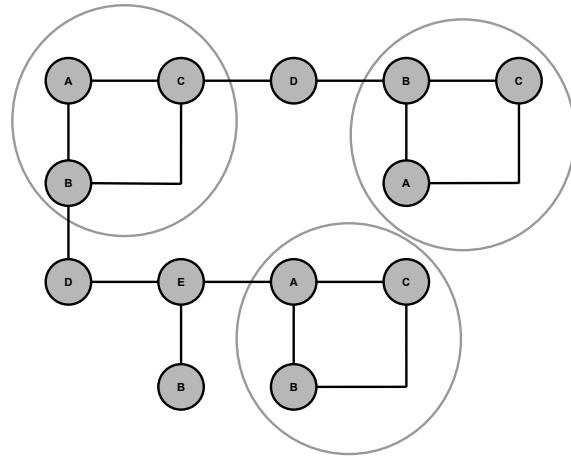


Figura 6.2: Ejemplo de subgrafo en un grafo simple. Fuente: adaptada de [58].

6.3. Algoritmos aplicados al análisis vial

No solo las características estructurales, sino también la implementación de algoritmos que posibilitan la evaluación de cuellos de botella, flujos, rutas y vulnerabilidades en la red, son determinantes para el análisis de redes de tráfico a través de teoría de grafos. Utilizar un grafo para representar una red de tráfico posibilita la aplicación de algoritmos tradicionales de optimización con el fin de solucionar problemas complejos relacionados con la movilidad. Estos procedimientos informáticos no únicamente explican el estado de la red, sino que también proponen soluciones prescriptivas para la navegación, la gestión de capacidad y la detección de infraestructuras esenciales. Como afirma [55] Los algoritmos utilizados en redes espaciales representan una conexión directa entre el modelo matemático y la conducta real del sistema urbano.

6.3.1. Algoritmos de camino (Dijkstra y A*)

Los algoritmos de caminos mínimos posibilitan el cálculo del camino más eficaz entre dos puntos de la red, ya sea considerando la distancia, el tiempo o el costo. El algoritmo de Dijkstra, por ejemplo, se emplea mucho en sistemas de análisis y navegación del tráfico porque tiene la habilidad de identificar rutas óptimas en grafos ponderados. Para calcular la ruta menos costosa en grafos con pesos no negativos, Dijkstra sigue siendo el estándar básico. Su operación se fundamenta en una exploración sistemática y extensa desde el nodo inicial, asegurando de manera matemática el descubrimiento del óptimo global.



De acuerdo con [59], los algoritmos de caminos mínimos son los fundamentos de los sistemas contemporáneos para la planificación de rutas y tienen una utilidad especial en las redes urbanas. No obstante, en redes urbanas de gran tamaño que necesitan respuestas en tiempo real, el análisis detallado de Dijkstra podría ser costoso desde el punto de vista computacional [60].

Código 1: Pseudocódigo del Algoritmo Dijkstra

```

1   Dijkstra(Grafo G, Nodo origen):
2       Para cada nodo v en G:
3           distancia[v] ← ∞
4           previo[v] ← indefinido
5           distancia[origen] ← 0
6
7       Q ← conjunto de todos los nodos
8
9       Mientras Q no esté vacío:
10          u ← nodo en Q con distancia mínima
11          Q ← Q \ {u}
12
13          Para cada vecino v de u:
14              alt ← distancia[u] + peso(u, v)
15              Si alt < distancia[v]:
16                  distancia[v] ← alt
17                  previo[v] ← u
18
19      Retornar distancia, previo

```

Además, A* incluye una heurística que agiliza la búsqueda de rutas óptimas, lo cual es particularmente efectivo en redes extensas en las que se necesita disminuir los tiempos de cálculo. Es perfecto para el análisis del tráfico urbano cuando se dispone de información extra, como la estimación del tiempo de viaje o las posiciones geográficas, puesto que su heurística incrementa notablemente el rendimiento sin poner en riesgo la precisión. Investigaciones comparativas actuales evidencian que A* disminuye significativamente los tiempos de cálculo en situaciones dinámicas, mientras que Dijkstra garantiza la exactitud en la planificación estática [61].



Código 2: Pseudocódigo del algoritmo A*

```

1   A*(G, inicio, objetivo, heuristica h):
2       abierto ← {inicio}
3       g[inicio] ← 0
4       f[inicio] ← h(inicio)
5
6       Mientras abierto no esté vacío:
7           n ← nodo en abierto con f más bajo
8           Si n = objetivo:
9               retornar camino reconstruido
10
11          abrir ← abrir \ {n}
12          cerrar ← cerrar ∪ {n}
13
14          Para cada vecino v de n:
15              Si v en cerrar:
16                  continuar
17
18              tentativo_g ← g[n] + peso(n, v)
19
20              Si v no en abierto:
21                  abierto ← abierto ∪ {v}
22              Sino si tentativo_g <= g[v]:
23                  continuar
24
25              previo[v] ← n
26              g[v] ← tentativo_g
27              f[v] ← g[v] + h(v)

```

6.3.2. Algoritmo de flujo máximo (FordFulkerson)

Los algoritmos de **flujo máximo**, por ejemplo, el de **Ford-Fulkerson**, posibilitan la determinación de la mayor capacidad de tránsito entre dos puntos dentro de una red. Este algoritmo es particularmente útil en el análisis vial, ya que contribuye a detectar puntos críticos y a estimar la capacidad estructural de la red cuando varias rutas se unen en una zona crítica. La aplicación de este algoritmo es vital para identificar el "corte mínimo" de la red, es decir, el conjunto de vías cuya saturación restringe el flujo total del sistema, revelando así las limitaciones estructurales que no pueden resolverse simplemente optimizando los semáforos, sino que requieren expansión física [49].

Este método también posibilita modelar situaciones prácticas como desvíos, cierres de carreteras o la capacidad máxima de una avenida. A mi juicio, el valor fundamental del algoritmo reside en su habilidad para medir los límites operativos de la infraestructura, lo que resulta crucial para llevar a cabo la planificación urbana y manejar las emergencias.



Código 3: Pseudocódigo del algoritmo Ford-Fulkerson

```

1   FordFulkerson(G, s, t):
2       Para cada arista (u, v) en G:
3           flujo(u, v) ← 0
4
5       Mientras existe un camino aumentante P desde s a t:
6           capacidad_residual ← mínima capacidad residual en P
7
8           Para cada arista (u, v) en P:
9               flujo(u, v) ← flujo(u, v) + capacidad_residual
10              flujo(v, u) ← flujo(v, u) - capacidad_residual
11
12   Retornar flujo máximo

```

6.3.3. Análisis de centralidad

La importancia relativa de cada nodo en la red se puede evaluar a través del análisis de centralidad. Para el análisis de tráfico, este tipo de métricas es crucial, porque los nodos con mayor centralidad tienden a ser los más solicitados por los usuarios y, por lo tanto, los que tienen más probabilidades de congestión. Creo que estas métricas son una herramienta indispensable para reconocer puntos críticos y dar prioridad a las intervenciones urbanas.

Identificación de cuellos de botella (Betweenness centrality)

La centralidad de intermediación (**betweenness**) calcula la cantidad de las rutas más cortas que transitan a través de un nodo o una arista. Esta es una de las métricas más importantes para el análisis vial porque detecta cuellos de botella estructurales incluso antes de que se puedan ver datos reales sobre el tráfico. Investigaciones han revelado que los nodos con una alta betweenness tienden a coincidir con intersecciones cruciales en ciudades reales [62].



Código 4: Pseudocódigo del algoritmo de identificación de cuellos de botella

```

1     Betweenness(G):
2         Para cada nodo v:
3             BC[v] ← 0
4
5             Para cada nodo s en G:
6                 pila ← vacía
7                 pred ← lista de predecesores
8                 sigma[todos] ← 0
9                 sigma[s] ← 1
10                dist[todos] ← -1
11                dist[s] ← 0
12                cola ← {s}
13
14            Mientras cola no esté vacía:
15                v ← extraer cola
16                insertar v en pila
17                Para cada vecino w:
18                    Si dist[w] < 0:
19                        dist[w] ← dist[v] + 1
20                        agregar w a cola
21                    Si dist[w] = dist[v] + 1:
22                        sigma[w] ← sigma[w] + sigma[v]
23                        agregar v a pred[w]
24
25            delta[todos] ← 0
26            Mientras pila no esté vacía:
27                w ← sacar pila
28                Para cada v en pred[w]:
29                    delta[v] ← delta[v] + (sigma[v] / sigma[w]) * (1 + delta[w])
30                    Si w = s:
31                        BC[w] ← BC[w] + delta[w]
32
33        Retornar BC

```

Centralidad de cercanía (Closeness centrality)

La **centralidad de cercanía (closeness)** señala cuán accesible es un nodo comparado con los demás nodos de la red. En redes urbanas, un nodo que tiene una alta cercanía es el que permite acceder a numerosos otros nodos de manera rápida. Para determinar las áreas con una mejor accesibilidad general y para medir la eficacia del diseño vial, esta métrica es fundamental. Según [55], Destaca que la proximidad demuestra la habilidad de una red para interconectar sus elementos de manera eficaz.



Código 5: Pseudocódigo del algoritmo centralidad de cercanía

```

1   Closeness(G):
2       Para cada nodo v:
3           distancias ← ejecutar Dijkstra desde v
4           CC[v] ← (n - 1) / suma(distancias)
5
6   Retornar CC

```

Centralidad de grado (Degree centrality)

La centralidad de grado determina los "hubs" locales o las intersecciones que cuentan con más conexiones directas, es decir, cuantifica la cantidad de conexiones directamente relacionadas con un nodo y muestra su relevancia topológica inmediata. Esta métrica sirve para entender las jerarquías locales dentro de la red urbana y para identificar cruces con un volumen potencial de tráfico elevado. Como [53] muestra en su investigación, esta métrica revela la estructura básica del entramado vial.

Código 6: Pseudocódigo del algoritmo de centralidad de grado

```

1   Para cada nodo v:
2       DC[v] ← número de aristas conectadas a v
3
4   Retornar DC

```

6.4. Detección de nodos críticos y vulnerabilidad de la red

La identificación de **nodos críticos** tiene como objetivo establecer qué intersecciones son fundamentales para preservar la fluidez y la integridad del sistema vial. Una red que depende en gran medida de unos pocos nodos es más susceptible a las congestiones y los errores. Este análisis es fundamental para que los municipios establezcan prioridades en sus intervenciones, pues un único nodo crítico puede impactar de manera severa el funcionamiento de toda la ciudad.

De acuerdo con [63], estos estudiaron la vulnerabilidad de las redes de transporte y determinaron que eliminar nodos críticos podría dividir gravemente la red, disminuyendo su eficacia y conectividad. Esta clase de análisis facilita prever riesgos, idear rutas alternativas y fortalecer la capacidad de resistencia urbana frente a emergencias, cierres o picos en la demanda.



Código 7: Pseudocódigo del algoritmo de centralidad de grado

```

1   NodosCriticos(G):
2       críticos ← []
3
4       Para cada nodo v en G:
5           G_temp ← G sin v
6           componentes ← contar componentes conexas en G_temp
7
8           Si componentes > 1:
9               agregar v a críticos
10
11      Retornar críticos

```

6.5. Simulación del tráfico vehicular con grafos

Simular el tráfico vehicular a través de grafos es una herramienta clave para analizar cómo se comportan las redes urbanas de manera dinámica, sin tener que recurrir en un principio a modelos detallados o a la recolección de grandes cantidades de datos en campo. Esta aproximación presenta una ventaja fundamental: posibilita que la ciudad sea entendida como una red matemática formada por aristas (vías) y nodos (intersecciones), lo que hace posible determinar patrones de tránsito, cuellos de botella y otras opciones de ruta a partir de la estructura del sistema. Como señala [55], Los modelos que se basan en grafos son útiles para comprender las características funcionales y espaciales de las ciudades, lo que los convierte en un marco teórico extenso para investigar la movilidad urbana.

En este marco, la simulación se basa en el otorgamiento de pesos dinámicos a las aristas; estos pesos simbolizan parámetros cruciales como la capacidad, la velocidad, el tiempo de trayecto o los niveles de congestión. Esta representación brinda una manera adaptable de reproducir diversas situaciones urbanas, como la evaluación de rutas alternativas, las interrupciones temporales debido a accidentes o trabajos y el incremento en horas pico.

SUMO como herramienta de simulación basada en grafos

A pesar de que Simulation of Urban Mobility (SUMO) es visto como un simulador microscópico del tráfico, su estructura interna se basa en la representación de la red vial a través de grafos dirigidos y ponderados, donde:

- Los **nodos** simbolizan intersecciones, enlaces internos y puntos significativos de la red.
- Las **aristas** son segmentos de vías que exhiben características como la pendiente, la velocidad máxima, el número de carriles, las limitaciones para dar vuelta y la



capacidad.

- Los **pesos** de un grafo están relacionados con los tiempos de viaje, las distancias o los costos cambiantes vinculados al tránsito vehicular.

Como señala [64], SUMO utiliza un grafo dirigido para simular la red vial, al que añade información extra con el fin de replicar el comportamiento de los vehículos de manera fidedigna.

Esta representación permite que SUMO implemente algoritmos de caminos mínimos como Dijkstra o variantes heurísticas como A* para asignar rutas basadas en tiempo de viaje o congestión estimada. En mi opinión, esta integración entre teoría de grafos y microsimulación constituye una de las fortalezas centrales de SUMO, ya que posibilita simular escenarios complejos de movilidad utilizando una estructura matemática robusta como base conceptual.

Además, SUMO combina el grafo vial con modelos de comportamiento vehicular, lo que permite simular fenómenos como colas, aceleraciones, frenado, distancia de seguridad, propagación de ondas de choque y efectos acumulativos de congestión. De esta forma, el grafo funciona como el soporte estructural de la red, mientras que la simulación dinámica permite aproximarse a condiciones reales del tráfico.

Integración de grafos y simulación en la toma de decisiones

El análisis de las intervenciones urbanas antes de su implementación física es posible gracias a la combinación de herramientas fundamentadas en grafos y motores de simulación como SUMO, lo cual disminuye costos y riesgos. Estas metodologías posibilitan la evaluación de interrogantes tales como: ¿Qué sucede si se cierra una vía? ¿Cómo varía el flujo al agregar un carril? ¿Qué camino puede llegar a ser un cuello de botella con un desvío? O bien, ¿cuál es la mejor reconfiguración semafórica para disminuir los tiempos de espera? Según [65], incluso los modelos simplificados pueden capturar las dinámicas globales del tráfico, lo cual respalda la utilidad de estas herramientas en las primeras etapas del análisis urbano.

En términos prácticos, considero que esta clase de simulación basada en grafos resulta especialmente pertinente para ciudades como Comayagua, donde la estructura vial es relativamente concisa y los puntos de congestión suelen concentrarse en intersecciones clave. Evaluar escenarios simulados ofrece información inmediata y útil para diseñar estrategias de circulación, gestionar desvíos y planificar el crecimiento urbano.



6.6. Retos y limitaciones de la teoría de grafos en la movilidad urbana

A pesar de su utilidad, la teoría de grafos presenta retos significativos cuando se aplica al análisis del tráfico urbano. En mi opinión, el mayor desafío radica en que el tráfico real es un fenómeno dinámico, influenciado por factores humanos, ambientales y operativos que un modelo puramente estructural no siempre puede captar. Los grafos representan eficazmente la topología vial, pero no modelan de forma nativa elementos como la agresividad de los conductores, la variabilidad de velocidades, cambios bruscos por incidentes o la microinteracción entre vehículos. Según [53], los grafos posibilitan un análisis exhaustivo de la estructura, su capacidad predictiva se encuentra fuertemente condicionada por la calidad y disponibilidad de datos sobre movilidad.

Además, hay retos vinculados a la complejidad de los cálculos. A pesar de que los grafos posibilitan modelar redes extensas, algunos problemas —como la simulación de congestión que depende del volumen, el análisis de vulnerabilidad o la identificación de rutas óptimas múltiples— pueden aumentar significativamente la carga computacional, en particular en las redes urbanas más grandes. Esta limitación puede limitar el análisis en términos de resolución o nivel de detalle. Por último, otro reto importante es la representación parcial de la realidad urbana. Las redes viales comprenden no solamente nodos y aristas, sino también semáforos, direcciones de circulación, clases de vías, áreas para estacionar, transporte público, ciclistas y peatones. Si estos elementos no se incorporan, el análisis puede ser incompleto.



7

Contexto Específico del Estudio

Contenido del Capítulo

7.1.	Panorama de la movilidad vehicular en Honduras	50
7.2.	Características del tráfico en la ciudad de Comayagua	51
7.3.	Principales avenidas e intersecciones críticas en Comayagua	52
7.4.	Relevancia del uso de inteligencia artificial en la ciudad	56

7.1. Panorama de la movilidad vehicular en Honduras

En Honduras, la congestión vehicular es consecuencia de elementos sociales, estructurales y económicos que contribuyen a que se contamine más y disminuya la eficacia del transporte en las ciudades. El parque automotor ha crecido de manera sostenida durante la última década, sobre todo en ciudades relevantes como Tegucigalpa, Comayagua, y San Pedro Sula. En estas urbes, el crecimiento urbano ha rebasado la capacidad para planificar el transporte y las vías. En una entrevista de 2023 con [66], el alcalde de Tegucigalpa, Jorge Aldana, reveló datos críticos sobre la movilidad de la capital. Mencionó que la ciudad cuenta con una red vial pavimentada de 841 km, una infraestructura diseñada para sopportar idealmente el tránsito de unos 250,000 vehículos. Sin embargo, a raíz de la pandemia de COVID-19, la adquisición de automóviles se disparó, resultando en un parque vehicular matriculado de aproximadamente 600,000 unidades en esa fecha, lo que representa un incremento del 7.8 % y una sobrecarga significativa para la infraestructura existente.

Según Instituto Nacional de Estadística (INE) [67], en Honduras al culminar el año 2021, las importaciones de vehículos aumentó a 880 millones de dólares, con esto se registra un aumento del 94 % en comparación al año anterior, ya que en 2020 las importaciones rondaban los 454 millones de dólares. Al finalizar el año 2021, el parque vehicular aumento a 2,415,192 unidades registrando un incremento del 10 %.



Figura 7.1: Evolución del parque vehicular en Honduras. Fuente: INE en base a datos extraído del Instituto de la Propiedad

En la ciudad de Tegucigalpa, se aplicó un plan de alivio vial, ya que una buena parte del parque vehicular es ocupado por empleadores públicos, a los cuales se les impuso una medida inmediata la cual es “teletrabajo”. Teniendo como objetivo disminuir en un 25 %



la carga vehicular diaria [68].

7.2. Características del tráfico en la ciudad de Comayagua

Ubicada en el centro de Honduras, Comayagua se beneficia de una posición geográfica favorable al estar ubicada justo sobre la carretera CA-5, que es una de las principales rutas del país y enlaza a Tegucigalpa con San Pedro Sula. Esta posición estratégica genera un tráfico mixto y significativo, que incluye el tránsito vehicular local, el transporte de pasajeros entre ciudades, el tránsito nacional y el tránsito pesado de carga. Comayagua posee unas dinámicas peculiares en el flujo vial, en las horas de menor demanda, el tráfico local suele tener una densidad baja; no obstante, en los horarios de la mañana y la tarde, el incremento del flujo interurbano se combina con el tráfico local, causando congestión en las intersecciones clave. Consideramos que esta dualidad inherente “funcionar como ciudad tanto de destino como de paso” exige la necesidad de establecer modelos de gestión que puedan distinguir entre el flujo interno y el de tránsito. Este requisito introduce una complejidad considerable al diseño de sistemas de control de semáforos, a la estrategia de rutas alternativas y a la priorización del tráfico. Comayagua experimentó un crecimiento sostenido en su parque vehicular entre 2017 y 2021, pasando de 93,558 a 135,376 unidades durante ese periodo, lo que representa un incremento del 45 % y muestra una expansión significativa en la cantidad de vehículos registrados año tras año, a pesar de que su volumen total sigue siendo inferior al de departamentos como Francisco Morazán y Cortés, esta tendencia evidencia que el dinamismo económico y la urbanización están impulsando la movilidad y el desarrollo en la región [67].

Tabla 7.1: Parque vehicular clasificado por departamentos

Departamento	2017	2018	2019	2020	2021
Francisco Morazán	488,373	531,934	568,329	597,857	627,288
Cortés	150,000	152,000	155,000	158,000	160,000
Atlántida	112,597	125,337	140,571	151,284	165,387
Yoro	100,748	113,052	123,492	132,651	149,622
Comayagua	93,558	103,111	111,665	119,397	135,376
Olancho	83,788	94,687	104,952	113,543	128,872
Choluteca	65,313	73,150	80,578	86,826	97,744
El Paraíso	61,823	67,667	73,409	79,012	90,961
Colón	52,944	60,329	68,750	76,624	90,762
Copán	54,551	61,116	66,358	71,544	80,272
Santa Bárbara	50,398	55,841	61,002	66,018	76,676
Lempira	27,588	31,034	34,414	37,945	44,748

Continúa en la siguiente página



Tabla 7.1 (continuación)

Departamento	2017	2018	2019	2020	2021
Valle	24,990	28,274	30,924	32,948	37,509
Ocotepeque	23,104	25,027	27,076	29,573	33,649
Intibucá	21,543	24,266	27,105	29,370	34,357
La Paz	19,929	22,283	24,474	26,388	30,638
Islas de la Bahía	14,970	16,872	18,644	19,528	21,559
Gracias a Dios	2,021	2,266	2,650	2,930	3,727

Fuente: INE, en base a datos del Instituto de la Propiedad.

Otra característica visible del tráfico en Comayagua es la diversidad del parque vehicular. Se diferencia de grandes ciudades en donde se encuentra un mayor porcentaje de vehículos modernos, en ciudades intermedias se observa una mezcla de vehículos antiguos, motocicletas, transporte público informal, vehículos de carga ligera. Esa variabilidad hace que los modelos de tráfico no pueda suponer una uniformidad en velocidad, aceleración y comportamiento. Debido a esa heterogeneidad, el comportamiento del tráfico puede presentar micro congestiones locales frecuentes. Finalmente, un tema crítico es la infraestructura de apoyo limitada. La señalización vial es muy pobre, los sensores, las cámaras, carriles exclusivos, aceras, pasos peatonales seguros no están en todos los puntos necesarios, son casi inexistentes. Esta deficiencia afecta considerablemente la capacidad de monitoreo y control.

7.3. Principales avenidas e intersecciones críticas en Comayagua

En el contexto local de Comayagua, una de las intersecciones que presenta la mayor saturación vehicular es la confluencia donde finaliza el Bulevar 4 Centenario y comienza la Carretera RN-57 (vía de acceso principal). Esta intersección se ve especialmente sobrecargada al ser alimentada simultáneamente por la Calle 7 NO y la 7a CI NO. Según los datos de tráfico [69], esta intersección experimenta picos de congestión vehicular intensa, concentrados en los siguientes rangos horarios, los cuales reflejan los movimientos pendulares diarios.

- **9:00 am - 9:40 am:** Pico matutino tardío.
- **11:40 am - 3:00 pm:** Período prolongado de mediodía y almuerzo, con incremento de viajes de gestión y salida de jornada escolar.
- **4:20 pm - 5:40 pm:** Pico vespertino correspondiente a la salida de la jornada laboral.

Fuente: Datos extraídos de Google Maps.

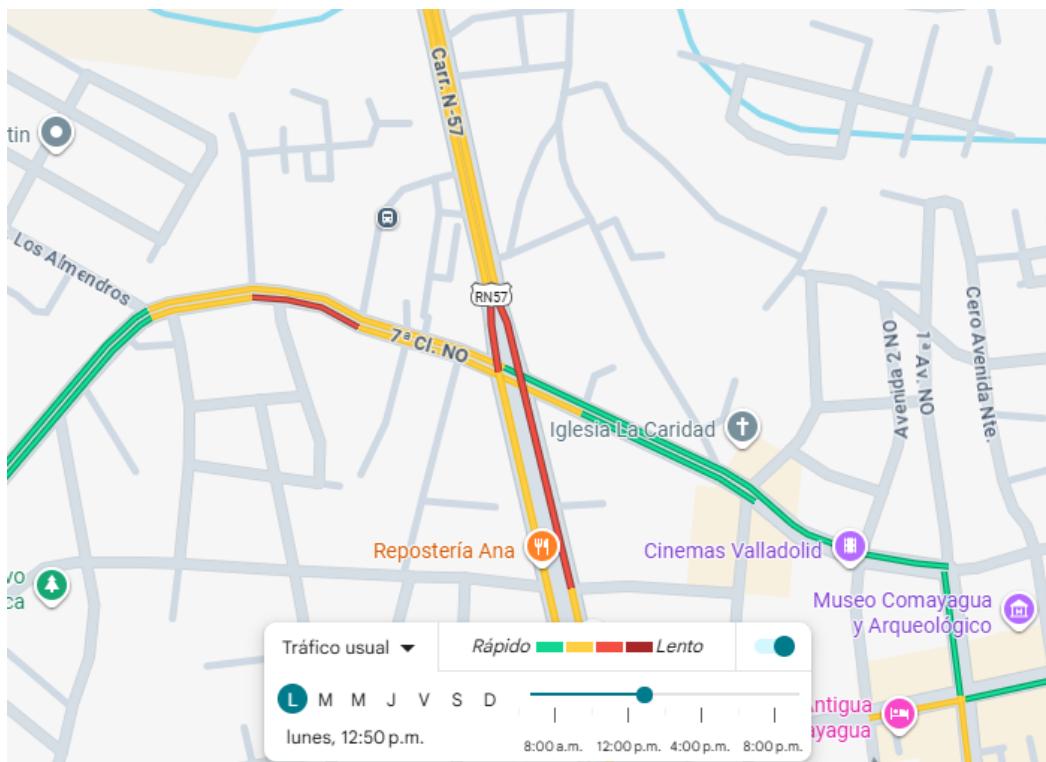


Figura 7.2: Intersección Bulevar 4 Centenario y Carretera RN-57. Fuente: Google Maps [69]

Otro punto de congestión relevante en Comayagua se localiza en el Bulevar 4 Centenario, específicamente en la intersección alimentada por la 4^a Calle S.O y la antigua CA-5. Es importante destacar que el alto nivel de tráfico se presenta primordialmente de lunes a viernes, ya que los fines de semana (sábados y domingos) el volumen vehicular experimenta una notable reducción. Durante la semana, los datos de tráfico [69] indican que esta zona experimenta picos de congestión significativos, concentrados en los siguientes períodos.

- **11:00 am - 1:00 pm:** Pico de mediodía, relacionado con actividades de almuerzo y gestión.
- **2:00 pm - 5:50 pm:** Período vespertino de alta congestión, siendo las 4:00 pm el momento en donde se alcanza la tasa máxima de tráfico.

Fuente: Datos extraídos de Google Maps.

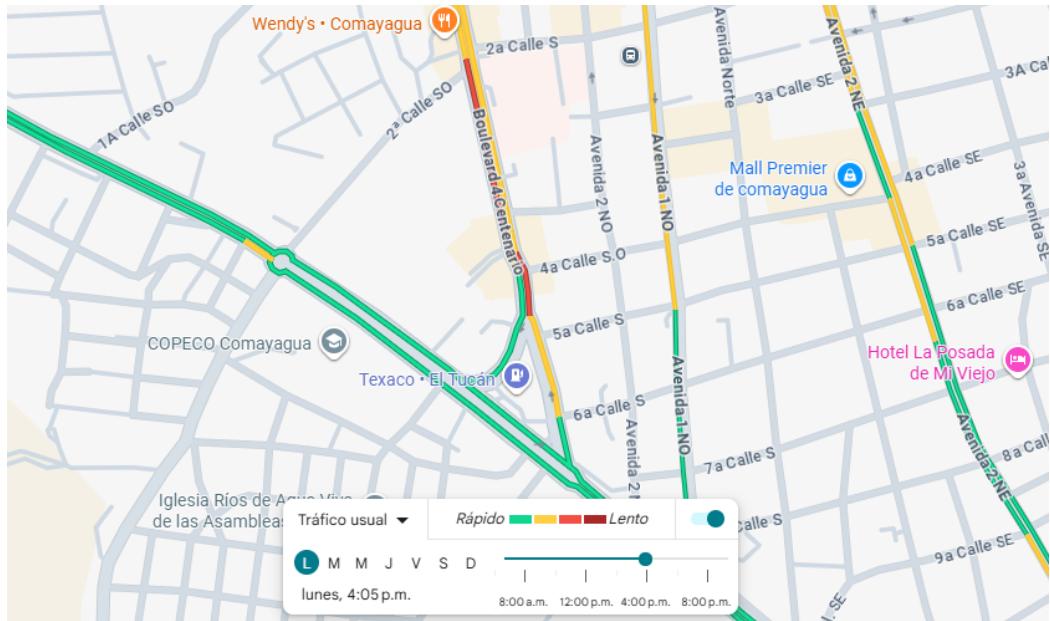


Figura 7.3: Intersección Bulevar 4 Centenario con 4a Calle S.O y antigua CA-5. Fuente: Google Maps [69]

De forma similar a las intersecciones previas, la Calle Cero también registra altos índices de tráfico vehicular, especialmente en el cruce donde es alimentada por el Bulevar IV Centenario, la Avenida 1 NO y la Avenida 2 NE. Esta intersección se caracteriza por mantener una congestión sostenida durante la mayor parte del día, con una reducción apenas perceptible del tráfico fuera de los picos. Los rangos horarios de máxima afluencia son:

- **09:00 am - 11:30 am:** Pico matutino de actividades centrales.
- **04:00 pm - 06:00 pm:** Pico vespertino, coincidiendo con la finalización de las jornadas laborales.

Fuente: Datos extraídos de Google Maps.

Es importante destacar que, fuera de estos horarios pico, esta calle se mantiene en un índice de tráfico de rango medio, lo que subraya un problema de saturación persistente a lo largo del día.

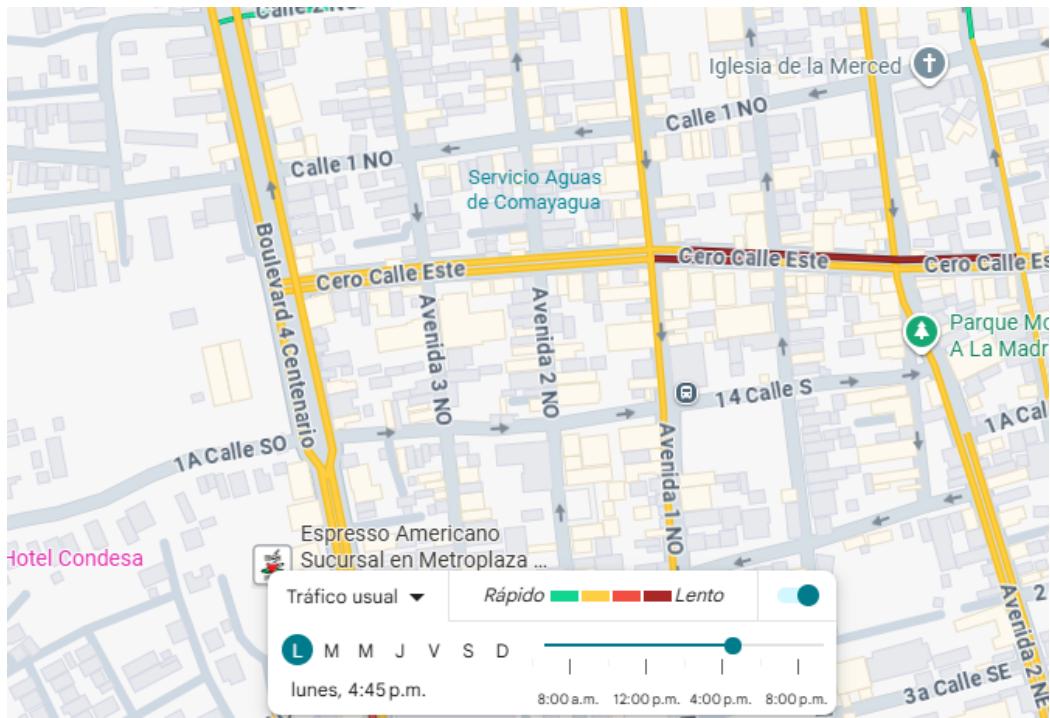


Figura 7.4: Intersección Calle Cero, Bulevar IV Centenario, Avenida 1 NO y Avenida 2 NE. Fuente: Google Maps [69]

La antigua carretera de la CA-5 (una carretera principal) sufre de alta congestión durante gran parte del día, desde las 10:00 a.m. hasta cerca de las 6:00 p.m., debido a que es el punto de confluencia de otras dos carreteras:

- RN-68
 - RV-217 (que está designada para la circulación del transporte interurbano).

La presencia del transporte interurbano de manera concentrada en esta vía, sumado al tráfico de las otras carreteras que convergen allí, es la causa principal de que pase la "mayor parte del tiempo congestionada".

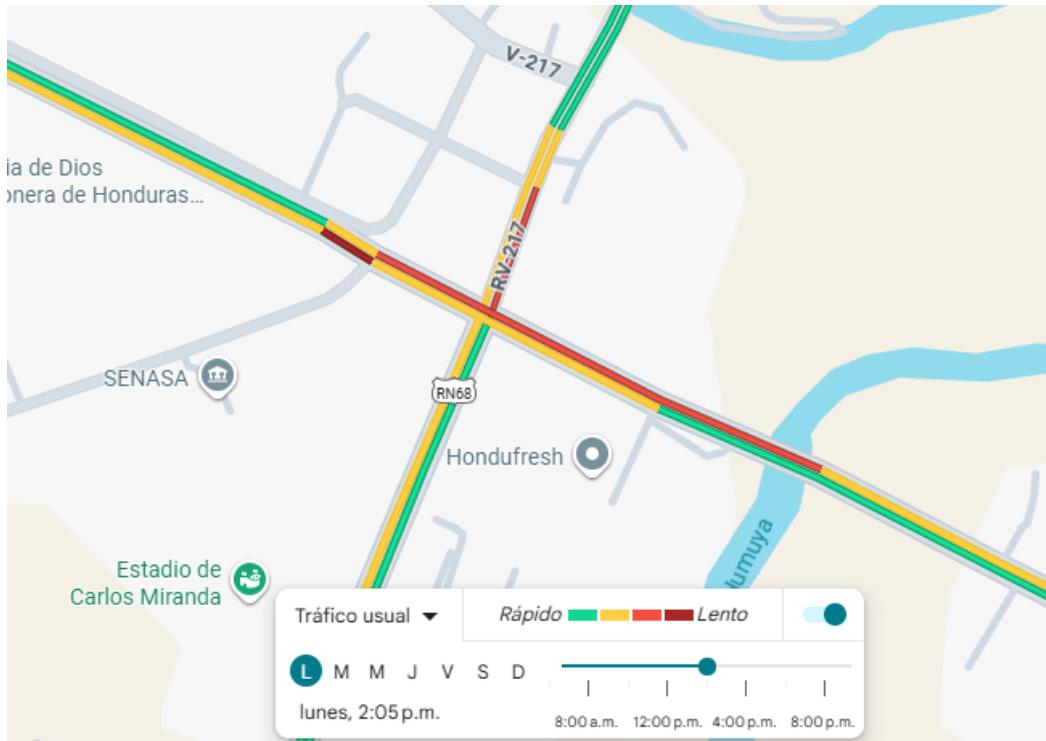


Figura 7.5: Intersección CA-5, Carretera RV-217 y RN-68. Fuente: Google Maps [69]

7.4. Relevancia del uso de inteligencia artificial en la ciudad

La ciudad de Comayagua, ubicada estratégicamente en el centro de Honduras, atraviesa un acelerado crecimiento vehicular y urbano derivado del desarrollo de infraestructura clave como el Aeropuerto Internacional de Palmerola y la modernización de la carretera CA-5. Este proceso ha impulsado la actividad económica local, pero también ha generado una creciente presión sobre la red vial existente, evidenciada en el aumento de los tiempos de desplazamiento y la saturación de las principales rutas de circulación.

Ante este contexto, el análisis de la movilidad urbana mediante modelos basados en teoría de grafos se presenta como una alternativa rigurosa y accesible para comprender el comportamiento estructural del tráfico. La representación de la ciudad como un grafo donde las intersecciones se modelan como nodos y las vías como aristas permite estudiar el nivel de conectividad, identificar rutas críticas, evaluar vulnerabilidades y estimar cómo los flujos vehiculares se distribuyen a través de la red. Este enfoque proporciona un marco sistemático para evaluar cuellos de botella, proponer rediseños de intersecciones y anticipar cómo el crecimiento urbano impactará sobre la infraestructura existente.

Además, el uso de herramientas de simulación basadas en redes, como SUMO, fortalece la capacidad analítica al permitir modelar escenarios realistas de tránsito, evaluar cambios en la infraestructura vial y examinar su impacto antes de ejecutarlos físicamente. En un país



donde los sistemas avanzados de monitoreo vial aún son limitados, estos métodos representan una oportunidad para impulsar estrategias de movilidad más eficientes, sostenibles y fundamentadas en análisis cuantitativos.

En Honduras, si bien las iniciativas tecnológicas aplicadas a la movilidad aún se encuentran en una etapa temprana, el **Plan de Movilidad** Urbana constituye un avance significativo, ya que establece lineamientos para la digitalización, levantamiento y sistematización de datos de tráfico vehicular y movilidad peatonal [70]. Este tipo de información es fundamental para representar la infraestructura vial mediante modelos basados en grafos, permitiendo analizar la estructura de la red, identificar puntos críticos y proponer mejoras orientadas a la eficiencia y sostenibilidad del transporte urbano.

Al adoptar la teoría de grafos como eje metodológico, Comayagua puede avanzar hacia una gestión urbana más técnica y basada en evidencia, posicionándose como un referente nacional y regional en la planificación moderna del transporte.



8

Marco Conceptual

8.1. Glosario conceptual del estudio

Movilidad Urbana: Conjunto de condiciones, infraestructuras y dinámicas que permiten el desplazamiento eficiente de personas y bienes dentro de una ciudad, considerando accesibilidad, seguridad, tiempos de viaje y calidad de vida.

Congestionamiento Vehicular: Situación en la que la demanda de circulación supera la capacidad de la infraestructura vial, produciendo reducción de velocidad, aumento de densidad y retrasos generalizados.

Intersección Crítica: Punto de la red vial donde convergen varios flujos y se presenta un alto riesgo de saturación debido a su importancia dentro de la movilidad urbana.

Teoría de Grafos: Rama de las matemáticas que estudia estructuras formadas por nodos y aristas, utilizada para modelar redes viales, flujos de tráfico y rutas óptimas.

Nodo: Punto que representa una intersección, cruce o conexión dentro de un grafo, equivalente a un punto de decisión dentro de la red vial.

Arista: Conexión entre dos nodos en un grafo; en la red vial representa un tramo de calle o carretera por donde circulan los vehículos.

Sistemas Adaptativos de Control de Tráfico (ATSC): Tecnologías que modifican automáticamente la fase y duración de los semáforos según datos en tiempo real, mejorando la fluidez del tráfico.

Grafo Dirigido: Tipo de grafo en el que las aristas tienen una dirección específica, útil para modelar calles de un solo sentido o flujos vehiculares definidos.

Grafo Ponderado: Estructura de grafo en la que cada arista tiene un peso asociado, como distancia, tiempo o costo, permitiendo analizar rutas y eficiencia vial.

Camino Mínimo: Ruta de menor distancia o costo dentro de un grafo entre dos puntos, calculada mediante algoritmos como Dijkstra o A*.

Centralidad de Intermediación: Métrica en teoría de grafos que indica qué tan frecuentemente un nodo aparece en las rutas más cortas. En tráfico identifica intersecciones críticas.

Cuello de Botella: Zona de la red vial donde la capacidad es insuficiente para sopor-
tar la demanda, generando acumulación de vehículos y lentitud en el flujo.

Simulación de Tráfico: Proceso computacional que reproduce el comportamiento de
vehículos en una red vial para analizar escenarios, predecir congestión y evaluar so-
luciones.

SUMO (Simulation of Urban Mobility): Herramienta de simulación de tráfico mi-
croscópico que permite modelar redes viales, controlar semáforos, evaluar escenarios
y analizar el comportamiento vehicular.



9

Marco Legal

Contenido del Capítulo

9.1. Normativa legal y estándares técnicos	62
9.2. Normativa regional (Latinoamérica)	62
9.3. Marco Legal Nacional (Honduras)	63
9.4. Consideraciones éticas y de seguridad de la información	63

9.1. Normativa legal y estándares técnicos

A nivel internacional, existen diversos marcos regulatorios y estándares que orientan el diseño, la interoperabilidad y la seguridad de los ITS y de las aplicaciones basadas en inteligencia artificial. Algunos de los más relevantes para esta investigación son:

- **ISO 14813 (Intelligent Transport Systems ITS Reference Model Architecture):**
Define una arquitectura de referencia para los sistemas de transporte inteligente, estableciendo una estructura común para la integración de componentes de hardware, software y comunicación dentro de los ITS. Este estándar orienta cómo deben organizarse los subsistemas y servicios para garantizar la interoperabilidad entre distintos entornos urbanos.
- **ISO 39001:2012 (Road Traffic Safety Management Systems):**
Se fundamenta en la idea de que la responsabilidad es un asunto de todos: cada entidad con injerencia en el ámbito del transporte terrestre debe velar por la protección en las carreteras [71].
- **IEEE 1609 Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE):**
Se establece una estructura técnica y se normaliza una serie de funciones y puntos de conexión que facilitan la intercomunicación inalámbrica protegida y la entrada física dentro del automóvil [72].
- **IEEE 2846-2022 Assumptions for Safety-Related Models in Automated Vehicle Behavior:**
El estándar IEEE establece las premisas básicas sobre el movimiento de los usuarios viales que un modelo de seguridad en un Sistema de Conducción Automatizada debe tener en cuenta sin falta [73].

9.2. Normativa regional (Latinoamérica)

En América Latina, las políticas sobre movilidad inteligente y tecnologías de IA aún se encuentran en proceso de consolidación, pero existen lineamientos relevantes emitidos por organismos regionales y multilaterales:

- **Banco Interamericano de Desarrollo (BID):** aborda la necesidad crítica de mejorar la movilidad y el acceso al transporte para las poblaciones vulnerables en América Latina y el Caribe. La publicación define la movilidad universal como la capacidad de transportarse sin peligros y con información adecuada, y examina cómo los ITS a través de la tecnología, son herramientas esenciales para hacer que el transporte público y privado sea más accesible, seguro y confiable [74].



- **Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL):** proporciona un panorama detallado sobre cómo la transformación digital y la IA pueden ayudar a América Latina y el Caribe a superar sus principales obstáculos de desarrollo, identificados como la baja productividad, la alta desigualdad y la debilidad institucional [75].

9.3. Marco Legal Nacional (Honduras)

En Honduras, aunque no existe una ley específica que regule directamente los sistemas inteligentes de transporte o la inteligencia artificial, sí hay marcos normativos generales que inciden en su desarrollo y aplicación:

- **Ley de Tránsito:** Regula la circulación vehicular, las competencias de la Dirección Nacional de Vialidad y Transporte (DNVT) y la gestión de la seguridad vial.
- **Ley de Telecomunicaciones (Decreto No. 185-95):** Regula el uso de redes y sistemas de comunicación, lo que incluye la transmisión de datos vehiculares y la interconexión entre ITS en caso de que se incorporen futuras plataformas conectadas [76].
- **Agenda Digital Honduras 2030:** Plan estratégico a nivel nacional que le da un empuje al uso de tecnologías de punta, con un enfoque importante en optimizar la infraestructura, incluyendo la red vial del país. Este esquema fomenta iniciativas de innovación tecnológica enfocadas en el desarrollo sostenible [77].

9.4. Consideraciones éticas y de seguridad de la información

Todo desarrollo basado en inteligencia artificial debe regirse por principios éticos y de seguridad. En este sentido, se tomaron en cuenta los lineamientos del “Ethics Guidelines for Trustworthy AI” [78] de la Comisión Europea (2019), los cuales establecen que la IA debe ser:

- Legal (cumpliendo las leyes y regulaciones vigentes),
- Ética (respetando los derechos fundamentales y valores humanos), y
- Robusta (técnica y socialmente).

Asegurar el apego a estas directrices es crucial para que el esquema de simulación y estudio de tráfico que planteamos resulte claro, comprensible y fiable, inclusive cuando los datos empleados sean artificiales o meramente una estimación.







Parte III

MARCO METODOLÓGICO

10

Metodología

Contenido del Capítulo

10.1. Tipo de investigación	67
10.2. Diseño Metodológico	67
10.3. Involucrados en la investigación	68
10.3.1. Principales involucrados	68
10.3.2. Otros involucrados	68
10.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	69
10.5. Procedimiento	70
10.6. Herramientas tecnológicas utilizadas	72
10.7. Métodos de validación	74
10.7.1. Métricas de evaluación del modelo	74
10.7.2. Casos de uso	76

10.1. Tipo de investigación

Esta investigación se clasifica como **aplicada**, ya que su objetivo central es desarrollar soluciones prácticas y efectivas para un problema real: la congestión del tráfico urbano en la ciudad de Comayagua. Es aplicada porque trasciende el plano conceptual y se orienta directamente al diseño, construcción e implementación de un modelo tecnológico basado en teoría de grafos y simulación computacional, cuyo propósito es analizar y mejorar el flujo vehicular en un entorno urbano específico.

El enfoque adoptado prioriza la intervención práctica, utilizando herramientas computacionales para representar la red vial como un grafo, evaluar su comportamiento estructural y simular distintos escenarios de movilidad. La investigación inicia con un diagnóstico integral del estado del tráfico, identificando los puntos críticos de congestión, los patrones horarios y las características físicas de las intersecciones; esta base empírica permite sustentar la fase de modelado y simulación.

Además, se emplean técnicas estadísticas y algoritmos avanzados para analizar las causas subyacentes de los patrones de tráfico y sus variables determinantes. La aplicación de estos métodos tiene una finalidad instrumental: facilitar tanto la simulación del comportamiento vehicular como la implementación directa de estrategias inteligentes que reduzcan los embotellamientos.

En síntesis, la investigación se considera aplicada porque articula teoría y práctica para generar herramientas tecnológicas orientadas a la solución de un problema urbano concreto, contribuyendo a mejorar la eficiencia, la movilidad y la sostenibilidad del sistema de transporte en Comayagua.

10.2. Diseño Metodológico

La presente investigación se desarrolla bajo un **enfoque cuantitativo**, orientado a analizar el comportamiento del tráfico vehicular mediante datos medibles y técnicas matemáticas aplicadas a la teoría de grafos. Este enfoque permite estudiar el tránsito desde una perspectiva objetiva, comparando condiciones, identificando patrones y evaluando la estructura de la red vial con precisión y consistencia.

El uso del método cuantitativo resulta adecuado debido a que el problema de congestión en Comayagua puede describirse a partir de variables observables y cuantificables, tales como el volumen vehicular, los tiempos de espera, la velocidad promedio, la capacidad de las intersecciones y la conectividad entre las vías. El análisis numérico de estos datos es fundamental para comprender el funcionamiento real de la movilidad urbana y detectar los puntos donde se producen mayores cargas o interrupciones del flujo.

Durante distintos períodos del día se registraron datos relacionados con el flujo vehicular, los tiempos de espera y la densidad de tráfico en puntos estratégicos de la ciudad. Estas



mediciones fueron realizadas con rigor para asegurar la coherencia y fiabilidad de los resultados. Aunque los valores obtenidos representan estimaciones, su análisis permite aproximarse al comportamiento habitual del tránsito en condiciones normales.

10.3. Involucrados en la investigación

En toda investigación orientada al estudio del tráfico vehicular, resulta esencial identificar a los involucrados, es decir, los **actores** que influyen o son afectados por la dinámica de movilidad urbana. Reconocerlos permite comprender de manera más precisa cómo se estructura y se comporta el sistema vial de Comayagua, y facilita la interpretación de los datos recolectados durante el trabajo de campo.

La caracterización de estos actores también contribuye a contextualizar los resultados obtenidos mediante los modelos basados en teoría de grafos y las simulaciones realizadas, ya que cada grupo aporta información, necesidades y perspectivas distintas sobre el funcionamiento real del tránsito. De esta forma, identificar a los involucrados se convierte en un paso clave para analizar el sistema vial de manera integrada y coherente.

10.3.1. Principales involucrados

El grupo de relevancia está conformado por los **conductores**, quienes constituyen el eje central del sistema de movilidad. Su comportamiento, decisiones y hábitos de conducción influyen directamente en la fluidez del tráfico y en la aparición de congestiones. Durante el proceso de observación se identificó que muchos de los retrasos y embotellamientos se originan por maniobras inadecuadas, paradas en lugares no autorizados o una baja capacidad de anticipación ante los cambios del flujo vehicular. Comprender estos patrones de comportamiento fue, ya que permite asociar las variaciones del flujo vehicular no solo a la capacidad física de las vías, sino también a los factores humanos que inciden en la eficiencia del tránsito.

10.3.2. Otros involucrados

Aunque estos grupos no fueron incorporados como variables cuantitativas en el análisis, se mencionan debido a su influencia significativa en el flujo vehicular. Los **usuarios** del transporte público, tales como taxis y autobuses, desempeñan un rol dual: facilitan la movilidad de muchas personas, pero sus paradas frecuentes en sitios no autorizados y la competencia por clientes en vías concurrencias aumentan la congestión. La falta de puntos establecidos para el ascenso y descenso de pasajeros, junto al elevado número de vehículos en ciertas rutas, contribuye a deteriorar la fluidez del tráfico, especialmente en horarios de mayor demanda.



Por otro lado, los **peatones**, aunque no operan vehículos, inciden directamente en la dinámica del tránsito. La ausencia de infraestructuras adecuadas, como puentes peatonales o semáforos exclusivos, y los cruces fuera de las zonas permitidas o en momentos inadecuados, generan demoras y obstaculizan el desplazamiento vehicular.

Finalmente, las **autoridades municipales** responsables de la gestión vial, si bien su intervención en el estudio fue de carácter observacional, resultan clave en la regulación del tráfico mediante la implementación de medidas como la reprogramación de semáforos, restricciones de giros y delimitación de zonas para carga y descarga, las cuales pueden modificar sustancialmente las condiciones de movilidad urbana. Por ello, los resultados obtenidos con las simulaciones basadas en inteligencia artificial se diseñaron para apoyarlos en la toma de decisiones estratégicas.

10.4. Técnicas e Instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos constituye una fase fundamental dentro de la metodología de esta investigación, ya que permite obtener la información base para el análisis, modelado y simulación del tráfico vehicular en la ciudad de Comayagua. Los datos empleados han sido obtenidos a partir de **observaciones directas** y estimaciones basadas en la experiencia personal del investigador, complementadas con fuentes secundarias de carácter técnico y municipal. Este enfoque, si bien limita la precisión absoluta de los datos, proporciona una aproximación razonable a las condiciones reales del entorno vial, suficiente para efectos de simulación y análisis en entornos virtuales como SUMO.

La técnica principal utilizada fue la observación sistemática no participante, la cual consistió en registrar manualmente los comportamientos del tráfico durante diferentes franjas horarias (pico matutino, mediodía y vespertino), en puntos estratégicos de la ciudad donde se concentra la mayor afluencia vehicular. Estos puntos incluyeron las principales arterias viales de Comayagua, como el bulevar Roberto Romero Larios, la carretera CA-5. En cada sitio se observó la densidad del tráfico, los tipos de vehículos predominantes, las velocidades promedio y los tiempos aproximados de espera en intersecciones. Además de la observación, se aplicó una técnica de estimación de flujos vehiculares basada en el conteo visual y la proyección por intervalos de tiempo. Esta técnica consistió en medir la cantidad promedio de vehículos que transitan por una vía durante lapsos de 10 a 15 minutos, para luego extrapolar los valores a una hora completa.

En cuanto a los instrumentos utilizados, se emplearon herramientas digitales que facilitaron la recopilación y organización de la información. Entre ellas destacan Google Maps, OpenStreetMap y Waze, utilizadas para identificar y delimitar las áreas de estudio, obtener coordenadas geográficas precisas y trazar rutas de desplazamiento. También se recurrió al software SUMO como instrumento de análisis indirecto, ya que su módulo de generación de tráfico (**RandomTrips.py**) permitió contrastar los valores observacionales con escena-

rios simulados. De esta forma, los datos recolectados manualmente se tradujeron en parámetros digitales (rutas, velocidades, tasas de inserción vehicular), integrándose dentro de un modelo virtual del tráfico de Comayagua. Esta fase de digitalización de datos fue fundamental para vincular la observación empírica con el análisis cuantitativo, garantizando así la coherencia metodológica del estudio.

Finalmente, el uso de técnicas mixtas de registro observación directa, conteo visual y modelado en software proporcionó una base sólida para el análisis comparativo entre el flujo vehicular observado y los resultados generados por la simulación. Si bien las limitaciones inherentes a la falta de instrumentación electrónica reducen la exactitud en términos absolutos, el objetivo central del estudio no radica en la medición exacta, sino en la evaluación de la aplicabilidad de la inteligencia artificial como herramienta de optimización del tráfico vehicular. Por tanto, las técnicas de recolección empleadas son adecuadas para demostrar la viabilidad práctica del modelo propuesto en contextos urbanos con recursos tecnológicos limitados, como el caso de Comayagua.

10.5. Procedimiento

El procedimiento de esta investigación se estructuró mediante una secuencia metodológica compuesta por diversas fases interrelacionadas, diseñadas para garantizar un proceso sistemático, replicable y alineado con los objetivos propuestos. Cada fase aborda un componente específico del estudio, desde la observación empírica del entorno vial hasta la validación final del modelo de simulación. El enfoque empleado es de carácter aplicado, puesto que busca generar información útil para la gestión del tráfico urbano en Comayagua mediante herramientas cuantitativas, técnicas de modelado y métodos basados en la teoría de grafos, permitiendo obtener conclusiones medibles y transferibles a contextos urbanos similares.

Fase 1: Observación y diagnóstico del entorno vial

La primera fase consistió en un reconocimiento empírico del sistema vial de Comayagua, mediante visitas de campo y observaciones directas en distintos puntos de la ciudad. Se identificaron las principales vías de circulación, intersecciones críticas y zonas donde se produce la mayor congestión vehicular. Durante esta etapa, se levantaron datos aproximados sobre la cantidad de vehículos que transitan en horas pico. Este diagnóstico inicial permitió establecer una línea base del flujo vehicular, necesaria para la posterior simulación del entorno urbano.

Fase 2: Manejo y Ordenamiento de la Información Recopilada

Tras la adquisición de los datos, estos fueron organizados y depurados meticulosamente en hojas de cálculo, categorizándolos por clase, instante de registro y coordenadas geo-



gráficas. A continuación, la información fue migrada a un formato que se integrara sin problemas con las plataformas de simulación en uso. Dicha organización hizo posible el establecimiento de variables como la congestión vehicular, la extensión de las rutas y lacadencia de tránsito. Si bien los datos se obtuvieron mediante la mera observación y ciertos cálculos, el tratamiento cuantitativo aseguró que los valores integrados en la simulación reflejaran de manera fiel y lógica la dinámica verdadera del tráfico. Esta etapa se centró en alistar los datos numéricos para nutrir el modelo informático.

Fase 3: Análisis de la red vial aplicando la teoría de grafos

En esta fase se procedió a representar la red vial de Comayagua mediante un grafo dirigido y ponderado, donde los nodos corresponden a intersecciones y las aristas a segmentos viales. A partir de esta estructura, se aplicaron métricas fundamentales de la teoría de grafos, tales como:

- **Grado de entrada y salida**, para identificar intersecciones con mayor carga estructural.
- **Caminos mínimos**, útiles para determinar trayectos más eficientes.
- **Centralidades** (betweenness, closeness, degree), que permitieron reconocer nodos críticos y posibles cuellos de botella.
- **Componentes conexas y subgrafos relevantes**, para comprender la coherencia interna del sistema vial.

Este análisis permitió detectar vulnerabilidades, patrones topológicos y zonas de alto impacto en la dinámica de tráfico urbano.

Fase 4: Modelado del entorno urbano

En esta etapa se desarrolló un modelo digital del entorno vial utilizando el software SUMO. Los mapas fueron importados desde **OpenStreetMap** y posteriormente ajustados para reflejar fielmente la realidad de Comayagua, incorporando sentidos de circulación, restricciones de giro, límites de velocidad, semáforos y jerarquías de vías. La estructura construida en SUMO se alineó con el grafo previamente generado, permitiendo que cada elemento del modelo matemático tuviera su equivalente en la simulación. El propósito principal del modelado fue disponer de una representación dinámica del sistema vial para probar escenarios y contrastar el comportamiento de la red bajo diferentes condiciones.

Fase 5: Implementación de la simulación y análisis de escenarios

Una vez completado el modelo urbano digital, se ejecutaron diversas simulaciones modificando condiciones como volumen vehicular, rutas predominantes y distribución del flujo. Estas variaciones permitieron observar indicadores como demoras, velocidad promedio y

saturación de intersecciones. El análisis comparativo entre escenarios permitió examinar cómo la estructura del grafo influía en el rendimiento del sistema vial, y detectar puntos donde la topología de la red genera cuellos de botella o sobrecarga de flujo. En esta fase, la simulación se utilizó para validar las conclusiones derivadas del análisis de grafos y para estudiar el comportamiento emergente del tráfico en condiciones controladas.

Fase 6: Evaluación y validación de resultados

Finalmente, se llevó a cabo un proceso de validación mediante la comparación de los resultados obtenidos en la simulación con los patrones observados durante la fase de diagnóstico inicial. Se analizaron indicadores clave como reducción proyectada de congestión, duración de los desplazamientos y eficiencia del flujo vehicular. Esta evaluación buscó determinar la consistencia del modelo, su capacidad para representar adecuadamente el comportamiento real del tráfico y su utilidad para apoyar la toma de decisiones en la planificación vial. Los resultados confirmaron la pertinencia de utilizar teoría de grafos y simulación para identificar vulnerabilidades estructurales y proponer mejoras sostenibles en la movilidad urbana.

10.6. Herramientas tecnológicas utilizadas

Para llevar a cabo este estudio, fue necesario combinar diferentes instrumentos tecnológicos que facilitaron el manejo y estudio eficaz de la información sobre el tránsito de vehículos. Por su carácter cuantitativo y aplicable, las herramientas seleccionadas hicieron hincapié en la simulación del tráfico urbano, así como en el análisis de datos mediante IA. En este apartado, se detallan los recursos tecnológicos más importantes que se usaron, clasificados en tres apartados: programas informáticos de simulación, lenguajes y espacios de programación, y plataformas de soporte computacional.

Software de Simulación

Se empleó Simulation of Urban Mobility (SUMO) para la modelación y el análisis del comportamiento del tráfico vehicular. A través de la configuración de rutas, cruces, semáforos y parámetros de conducción, este software hace posible reproducir con exactitud el flujo de vehículos en áreas urbanas. Se escoge SUMO porque es flexible, puede ser utilizado con varios formatos de datos y tiene la capacidad de incorporar scripts externos en Python, lo que permite comunicarse con algoritmos de IA. La creación de un mapa digital que represente la red vial de la ciudad analizada, en este caso Comayagua, con datos adquiridos de OpenStreetMap (OSM), es el fundamento del proceso de simulación en SUMO. Después, se crearon flujos de tráfico con cifras estimadas a partir de observaciones efectivas, modificando el número de vehículos, los tiempos de trayecto y los patrones de congestión. Gracias a este ambiente, fue posible simular situaciones de tráfico realistas, que son esen-



ciales para ensayar y cotejar estrategias de optimización.

Lenguajes y entornos de programación

Se utilizó Python para analizar y procesar los datos, ya que este lenguaje tiene la capacidad de gestionar información y una extensa disponibilidad de bibliotecas de inteligencia artificial y científicas. Algunas de las librerías más utilizadas son:

- **NumPy** proporcionó arreglos multidimensionales y operaciones matemáticas optimizadas, indispensables para manejar matrices, distancias, tiempos de viaje y pesos asociados a las aristas del grafo vial.
- Por su parte, **Pandas** ofrece herramientas sofisticadas para la organización, limpieza y transformación de datos tabulares, permitiendo un manejo ágil de series temporales y tablas de datos que resultan esenciales para preparar la información del tráfico para su análisis posterior.
- **Matplotlib** se empleó como la herramienta principal de visualización del proyecto. Permitió generar gráficos estáticos, diagramas comparativos y representaciones detalladas de flujos, distribuciones y métricas asociadas a la red vial. Su flexibilidad permitió ilustrar tendencias, identificar concentraciones de tráfico y visualizar nodos críticos, facilitando la comprensión del comportamiento de la movilidad urbana.
- Dado que el eje central del estudio es la teoría de grafos, **NetworkX** fue una biblioteca fundamental. Con ella fue posible:
 - Construir grafos dirigidos y ponderados a partir de los datos recopilados.
 - Calcular métricas como centralidades, grado, componentes conexas y caminos mínimos.
 - Detectar nodos vulnerables y analizar la estructura global del sistema vial.

NetworkX permitió traducir la información empírica en representaciones matemáticas ideales para el diagnóstico estructural del tráfico urbano.

- Para extraer y procesar la red vial desde OpenStreetMap se utilizó **OSMnx**, herramienta que permitió convertir datos cartográficos reales en un grafo utilizable dentro del análisis computacional. A través de ella fue posible obtener automáticamente:
 - Nodos (intersecciones)
 - Aristas (segmentos viales)
 - Sentidos de circulación
 - Atributos como longitud, velocidad permitida y tipo de vía

OSMnx facilitó la integración entre datos reales y el modelado por grafos de la red vial.

Plataformas de desarrollo y análisis

Durante la fase de programación y simulación se utilizaron tres plataformas principales:

- **Visual Studio Code (VS Code)**: entorno de desarrollo integrado (IDE) utilizado para escribir, depurar y ejecutar los scripts en Python. Su soporte para extensiones Python permitió un entorno de trabajo ordenado y eficiente.
- **Google Colab**: plataforma en la nube utilizada para el entrenamiento de los modelos de inteligencia artificial y la ejecución de procesos computacionalmente intensivos. Al ofrecer recursos de GPU gratuitos, permitió mejorar los tiempos de procesamiento sin necesidad de contar con hardware avanzado.
- **Microsoft Excel**: herramienta utilizada para organizar los datos generados durante las simulaciones, elaborar tablas comparativas, calcular indicadores clave (velocidad media, flujo, densidad) y crear representaciones gráficas preliminares para análisis.

Hardware y Software

El proyecto se desarrolló en una computadora portátil Lenovo Ideapad S340 15IWL, equipada con procesador Intel Core i5, 8 GB de memoria RAM y 500 GB de almacenamiento interno, con sistema operativo Windows 11. Este equipo ofreció un equilibrio adecuado entre capacidad de procesamiento y portabilidad, permitiendo ejecutar las simulaciones de tráfico, procesar datos y entrenar modelos de inteligencia artificial de manera eficiente. La configuración del hardware fue suficiente para soportar los requerimientos computacionales de SUMO y Python, siempre que los escenarios de simulación se mantuvieran dentro de un tamaño y complejidad moderados.

10.7. Métodos de validación

La **validación** constituye una de las etapas más críticas dentro del proceso metodológico, pues garantiza que el modelo propuesto y las herramientas implementadas cumplan con los objetivos establecidos de manera eficaz, precisa y reproducible. En el presente estudio, la validación se llevó a cabo mediante pruebas de rendimiento del modelo de simulación, evaluación de métricas cuantitativas y análisis de casos de uso específicos que permitieron comprobar la aplicabilidad del sistema en distintos escenarios de tráfico urbano en la ciudad de Comayagua.

10.7.1. Métricas de evaluación del modelo

Para asegurar que los hallazgos logrados mediante el análisis por teoría de grafos y la simulación en SUMO reflejan con precisión la conducta real del sistema vial de Comayagua, la validación es una fase esencial. Para evaluar la pertinencia, la confiabilidad y la



consistencia del modelo desarrollado, este estudio utilizó una mezcla de métodos comparativos y cuantitativos. Estos procedimientos posibilitan comparar los patrones simulados con observaciones empíricas, comprobar la coherencia de las métricas topológicas y examinar el rendimiento del sistema en diferentes contextos. Los métodos más importantes que se usaron fueron:

Validación empírica de campo

Esta técnica se basa en cotejar los resultados que el modelo ha dado (duración de trayectos, puntos de congestión) con las observaciones directas que se han recopilado durante la etapa de diagnóstico.

Se implementó a través de:

- Comparación entre los tiempos de desplazamiento simulados y los que se han medido manualmente en horas de mayor afluencia.
- Comprobación de la coincidencia entre los nodos críticos que se encuentran en el grafo y las intersecciones observadas como problemáticas.
- Verificación de los patrones de congestión que se repiten y se han observado en el campo.

Este procedimiento hace posible establecer si la red modelada replica de manera apropiada la dinámica vehicular real.

Validación estructural del grafo

Se comprobó la estructura de la red vial para asegurarse de que el grafo creado cumpliera con las características esperadas de una red urbana real:

- Conexión apropiada (falta de elementos desconectados en las vías principales).
- Correspondencia entre longitudes reales y pesos dados a los bordes.
- Sucesión lógica entre sentidos de circulación, limitaciones y jerarquías de las vías.
- Relación entre el grado de los nodos y la estructura vial que se puede observar (por ejemplo, en intersecciones primordiales o rotondas).

Antes de llevar a cabo simulaciones, este tipo de validación garantiza que el grafo represente con exactitud la estructura urbana.

Validación del modelo de simulación

Para verificar si el modelo en SUMO reproduce de manera apropiada conductas creíbles del tráfico urbano, se analizó su rendimiento.

La validación abarcó:



- Evaluación de la estabilidad del flujo vehicular en las simulaciones.
- Evaluación de la reacción del sistema a las fluctuaciones en la demanda.
- Verificación de que los patrones emergentes (colas, cuellos de botella, demoras) son congruentes con las conductas anticipadas en situaciones urbanas reales.

Aquellos escenarios cuyos resultados simulados se mantuvieron dentro de parámetros lógicos, basados en la literatura y la observación, fueron considerados plausibles.

Validación comparativa con trabajos y modelos existentes

Se contrastaron los resultados obtenidos con estudios similares en ciudades latinoamericanas de tamaño y estructura comparable, con el fin de verificar:

- Si los niveles de congestión pronosticados son lógicos.
- Si los patrones que se han encontrado (saturación en las horas pico, cuellos de botella en vías arteriales) concuerdan con investigaciones anteriores
- Si las métricas de centralidad y su interpretación concuerdan con lo que la literatura científica dice acerca de la movilidad urbana.

Esta validación facilita el análisis de si la conducta de la red vial en Comayagua se ajusta a patrones típicos en ciudades que están creciendo.

10.7.2. Casos de uso

Finalmente, se desarrollaron casos de uso concretos con el propósito de validar el modelo en diferentes condiciones operativas. Estos escenarios permitieron analizar la respuesta del sistema ante variaciones en el flujo vehicular, cambios en la infraestructura y modificaciones en el comportamiento del tránsito. Los casos más relevantes fueron los siguientes:

Caso 1 Condición base (hora valle):

Se simuló la operación del tráfico bajo condiciones normales, con un volumen promedio de 300 vehículos por hora. Este escenario fue utilizado para calibrar los parámetros iniciales del modelo y establecer una línea de referencia que sirviera como punto de comparación para los demás casos.

Caso 2 Condición de congestión (hora pico):

Se incrementó la demanda vehicular en un 30 % con respecto al caso base, con el objetivo de analizar el efecto sobre la velocidad promedio y los tiempos de recorrido. Este escenario permitió verificar la capacidad del modelo para representar situaciones de saturación y la formación de cuellos de botella dentro de la red vial.



Caso 3 Escenario de contingencia:

Se simuló la sustitución de un semáforo por una rotonda, lo que implicó modificar la estructura del grafo mediante la eliminación de la arista asociada al cruce semaforizado y la incorporación de nuevas conexiones que representan el flujo circular. Esta intervención permitió analizar la capacidad del modelo para adaptarse a cambios en la infraestructura vial y evaluar cómo se redistribuye el tráfico ante transformaciones físicas como obras, re-diseños geométricos o mejoras operativas.



Parte IV

IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA TECNOLÓGICA

11

Implementación

Contenido del Capítulo

11.1. Diseño de la Solución tecnológica	81
11.1.1. Arquitectura general del sistema	82
11.1.2. Flujo de procesos	83
11.2. Implementación	84
11.2.1. Preparación y estructuración de los datos	84
11.2.2. Desarrollo del modelo de análisis basado en teoría de grafos	84
11.2.3. Integración con la simulación de tráfico	85
11.2.4. Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas	87
11.2.5. Validación inicial del sistema	87
11.3. Pruebas y resultado preliminares	87
11.3.1. Análisis de la red vial mediante la teoría de grafos	87
11.3.2. Pruebas de simulación en SUMO	88
11.3.3. Pruebas de carga	89

11.1. Diseño de la Solución tecnológica

El diseño de la solución tecnológica es un paso fundamental en el proyecto, pues establece la estructura técnica y conceptual del sistema que se dirige a analizar y optimizar la circulación de vehículos utilizando teoría de grafos. Este método posibilita representar la red vial de Comayagua como un grafo ponderado, en el que las aristas son las vías de circulación y los nodos son las intersecciones. Se les asignan características como longitud, capacidad y velocidad máxima. El propósito es crear una herramienta que sea pertinente, versátil y acorde con la realidad de la ciudad.

La estructura del sistema se organiza bajo un **diseño modular**, integrando cuatro componentes principales:

- **Captura y organización de datos:** la recolección de datos sobre la movilidad vehicular se realiza en este módulo, utilizando técnicas de observación directa y fuentes de información georreferenciadas, como OSM. Se organizan y limpian los datos para crear el grafo vial y determinar las características necesarias de aristas y nodos.
- **Análisis de la red vial mediante teoría de grafos:** aquí se utilizan algoritmos y métricas de grafos, como caminos mínimos y centralidad, así como la detección de nodos críticos, para detectar cuellos de botella, rutas eficaces y debilidades en la infraestructura vial. Este análisis posibilita entender la topología de la red y prever cómo se comportará el flujo de vehículos en diferentes situaciones.
- **Simulación del tráfico:** se utiliza SUMO para simular el comportamiento de los vehículos en la red de grafos. Este módulo posibilita la realización de diferentes escenarios, el análisis de cómo repercuten las modificaciones en el flujo y la evaluación de cómo se distribuye el tráfico en situaciones normales, de congestión o de contingencia.
- **Presentación y estudio de resultados:** los datos obtenidos a partir de la simulación y el análisis se procesan y visualizan por medio de herramientas adicionales como Excel y entornos de programación como Python. Se producen gráficos, diagramas de flujo y métricas que hacen más sencillo el análisis de los resultados y la toma de decisiones.

Desde la perspectiva modular, esta arquitectura permite que la mantenibilidad y escalabilidad del sistema sean sencillas. Esto posibilita que la implementación de modificaciones futuras en la red vial, incorporación de sensores urbanos o integración con sistemas IoT no alteren la estructura general del modelo. Asimismo, la utilización de grafos ofrece una representación exacta y adaptable del sistema vial, lo cual es esencial para planificar y mejorar la movilidad urbana en Comayagua.



11.1.1. Arquitectura general del sistema

La arquitectura del sistema se estructura en cuatro niveles interconectados, los cuales se han creado para mostrar de forma precisa el recorrido de la información desde que es recolectada hasta que se visualizan los resultados:

- **Capa de obtención de datos:** esta capa alberga toda la información que se ha reunido acerca de la movilidad urbana en Comayagua. Se adquirieron los datos a través de observación directa. Combinan el número de vehículos, los horarios con mayor tráfico y las particularidades de las vías.
- **Capa de análisis con grafos:** se desarrolla y analiza la red vial en esta capa, utilizando herramientas informáticas y matemáticas que se fundamentan en la teoría de grafos. Las principales tareas que realiza son:
 - Edificación del grafo vial utilizando OSMnx, una biblioteca especializada en la descarga, modelado y proyección de redes urbanas directamente desde OpenStreetMap.
 - Análisis y procesamiento de la estructura con NetworkX, lo que posibilita el cálculo de métricas esenciales como:
 - el grado de los nodos,
 - rutas mínimas,
 - centralidades (grados de cercanía, grados de intermediación y grados),
 - detección de cuellos de botella y nodos decisivos.
 - Conversión del mapa vial en un grafo dirigido o no dirigido, dependiendo de las características de las carreteras.
 - Acondicionamiento de la red para exportarla a ambientes de simulación.
La combinación de OSMnx y NetworkX posibilita realizar un análisis sólido, replicable y basado en matemáticas del comportamiento de la red.
- **Capa de simulación:** En esta capa, se incorpora el grafo vial al simulador SUMO, lo que da lugar a un ambiente digital en el que se simulan diferentes situaciones de tráfico: condiciones normales, congestión o contingencias. La simulación posibilita la evaluación del efecto de las fluctuaciones en el tránsito vehicular y la exploración de la redistribución del tráfico según la topología de la red, confirmando así los patrones estructurales que se identificaron en la capa previa.
- **Capa de resultados:** esta capa muestra los resultados del análisis y la simulación a través de gráficos, empleando herramientas como hojas de cálculo y Matplotlib. Esta capa ayuda a interpretar la información, identificar patrones significativos y generar insumos para tomar decisiones acerca de la gestión de la movilidad urbana.

Este diseño por capas permite una **integración modular y escalable**, donde cada componente puede actualizarse o ajustarse sin afectar la totalidad del sistema, asegurando que la



red vial y los escenarios simulados puedan adaptarse a futuros cambios en la infraestructura urbana o nuevas estrategias de movilidad.

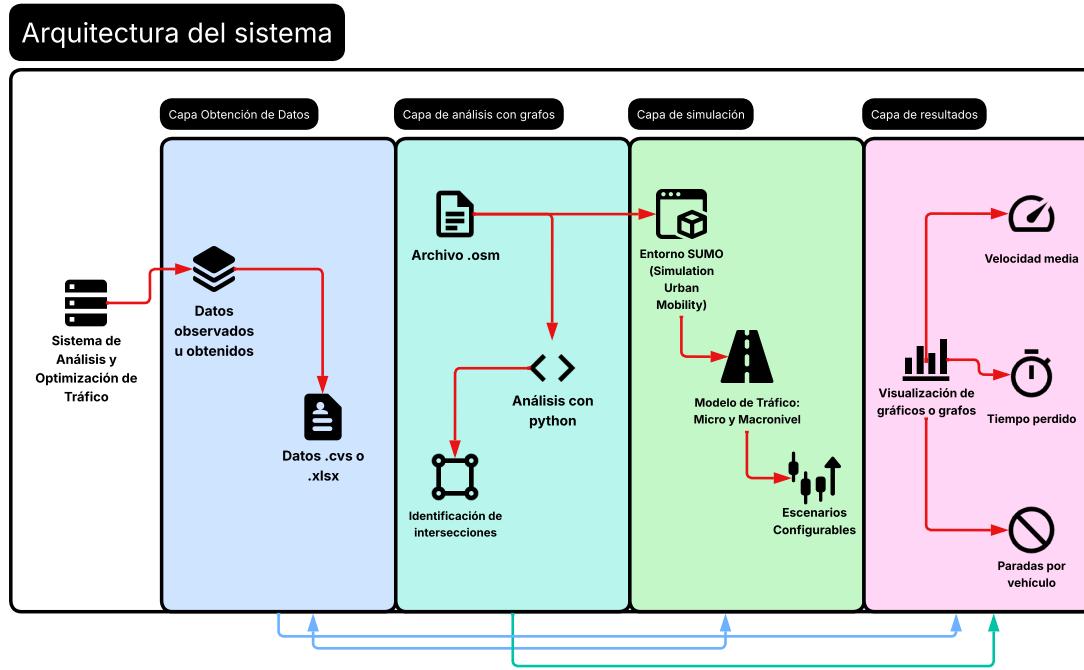


Figura 11.1: Arquitectura del Sistema de Análisis y Optimización del Tráfico Vehicular. Fuente: Elaboración propia.

11.1.2. Flujo de procesos

El recorrido operativo del sistema, conocido como flujo de procesos, se encarga de convertir la información reunida del tráfico datos sobre volumen, velocidad, densidad en hallazgos que ayudan a tomar buenas decisiones sobre cómo manejar el transporte, tanto a nivel estratégico como operativo. Pero ojo, esta conversión no es directa; más bien, sigue un ciclo estricto y permanente. El flujo tiene seis fases clave, puestas en orden en un circuito que va del análisis a la simulación y luego a la retroalimentación, todo para que el sistema mejore sin parar.

- Recolección de datos
- Análisis de la red vial (teoría de grafos)
- Simulación del tráfico (SUMO)
- Visualización de resultados

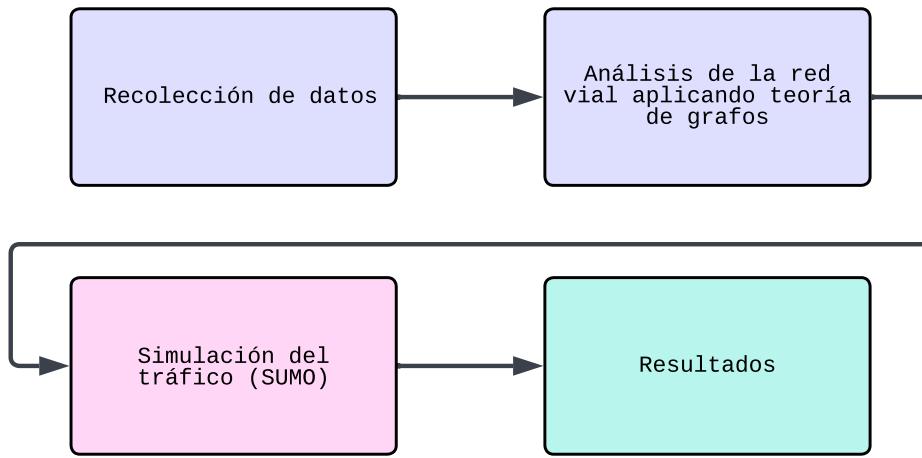


Figura 11.2: Flujo de procesos del Sistema de Análisis y Optimización del Tráfico Vehicular. Fuente: Elaboración propia.

11.2. Implementación

11.2.1. Preparación y estructuración de los datos

El procedimiento inició con la recogida y la estructuración de los datos observacionales que se habían recopilado en las avenidas y las intersecciones más relevantes de Comayagua. Los datos se volcaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, en la que constituimos campos de datos como: la hora, el tipo de vehículo, la cantidad, la velocidad estimada y el tiempo medio de espera.

El siguiente paso fue llevar a cabo un proceso de limpieza y de normalización de los datos. Se eliminaron valores incorrectos o fuera de rango y, por medio de este proceso, se definieron promedios representativos a intervalos de tiempo. La labor de preparación de los datos fue muy importante para obtener una coherencia en las variables antes de ser volcada el modelo predictivo.

11.2.2. Desarrollo del modelo de análisis basado en teoría de grafos

El modelo de análisis fue desarrollado en Google Colab, aprovechando su compatibilidad con librerías especializadas para el tratamiento de datos y análisis de redes como Pandas, NumPy, Matplotlib, OSMnx y NetworkX. La construcción y evaluación del modelo se organizaron en tres bloques fundamentales:

- **Importación de datos y creación del gráfico vial:** la cartografía vial fue obtenida a través de OSMnx, lo que posibilitó la extracción de la red vial desde OpenStreetMap.

Luego, se creó un grafo dirigido (DiGraph) en el que:

- Las intersecciones son representadas por los nodos.
- Los arcos son segmentos de vía.
- A cada arco se le asignaron características como la velocidad permitida, la longitud, el tipo de vía y la demanda proyectada.

Antes de llevar a cabo el análisis estructural, se llevaron a cabo visualizaciones iniciales utilizando histogramas, mapas y tablas; esto posibilitó entender cómo se distribuyó el tráfico en términos espaciales y temporales.

- **Construcción y análisis del modelo basado en grafos:** después de que la red vial fue estructurada, se pusieron en práctica métricas de teoría de grafos para examinar su funcionamiento y encontrar patrones significativos. Las métricas utilizadas abarcaron:

- Centralidad de grado y betweenness: para determinar los nodos y aristas que ejercen una influencia más notable en el flujo vehicular.
- Dijkstra: cálculo de rutas más cortas para estimar caminos óptimos en función del tiempo o la distancia.
- Identificación de cuellos de botella: a través del reconocimiento de aristas con carga relativa alta.
- Análisis de conectividad: con el fin de valorar la redundancia y la vulnerabilidad de la red.

La combinación de OSMnx y NetworkX posibilitó el manejo del grafo y la realización de algoritmos para el análisis estructural de manera exacta, sin recurrir a modelos predictivos.

- **Interpretación y visualización de los resultados:** por último, se elaboraron mapas y gráficos que revelaron:

- • Los caminos con mayor probabilidad de congestión y centralidad.
- • Porciones que funcionan como conexiones esenciales dentro de la red.
- • Distribución territorial del flujo vehicular calculado tomando como base la estructura del grafo.

Las visualizaciones posibilitaron la comparación de las métricas topológicas con los datos reales del tráfico, lo que validó la consistencia del modelo y facilitó el reconocimiento de las zonas más vulnerables en la red vial estudiada.

11.2.3. Integración con la simulación de tráfico

Una vez desarrollado y validado el modelo de análisis basado en teoría de grafos, este se integró con SUMO, herramienta open-source ampliamente utilizada en estudios académicos para simular redes de transporte urbano. La simulación permitió reproducir digitalmente

las condiciones del tráfico urbano de Comayagua y evaluar cómo la estructura y características del grafo influyen en el comportamiento vehicular bajo distintos escenarios. El proceso se llevó a cabo en las siguientes etapas:

Creación del mapa urbano

Se creó un archivo .net.xml que muestra la red vial principal de Comayagua, con avenidas, cruces y direcciones de tránsito. Para ello, se extrajeron las coordenadas y atributos viales desde OpenStreetMap y luego se convirtieron a un formato que SUMO puede procesar. En áreas de baja importancia, el mapa se simplificó; sin embargo, las zonas con más densidad de tráfico, que se identificaron mediante el análisis topológico del grafo, se conservaron con precisión.

Definición de flujos de vehículos

Se generaron archivos .rou.xml a partir de los cuales se definieron los tipos de vehículos (automóviles, buses, camiones, motocicletas) junto con sus rutas más utilizadas. Estos flujos fueron calibrados en función de los datos observacionales.

Simulación y control de tráfico

Se ejecutaron múltiples simulaciones considerando distintos escenarios: horas pico, horas valle, modificaciones en la demanda y variaciones estructurales menores. SUMO permitió registrar métricas como:

- velocidad media por segmento,
- tiempos de espera en intersecciones,
- densidad vehicular por tramo,
- y número de detenciones por nodo.

Toda la información fue exportada en archivos .xml y .csv, los cuales almacenan de forma estructurada los resultados detallados de cada escenario.

Análisis de escenarios

Los datos exportados se procesaron nuevamente en Python para comparar el desempeño de la red vial bajo diferentes configuraciones estructurales del grafo. A partir del análisis fue posible:

- identificar segmentos críticos,
- evaluar la sensibilidad del sistema a cambios en la demanda,
- comparar la eficiencia entre rutas alternativas,
- y examinar cómo la estructura topológica influye en la fluidez global del tráfico.

Los resultados permitieron evaluar la red desde una perspectiva analítica sin recurrir a



modelos predictivos, basándose únicamente en métricas de teoría de grafos y comportamiento simulado.

11.2.4. Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas

El desarrollo completo del sistema se llevó a cabo utilizando los siguientes recursos tecnológicos:

- Lenguaje de programación: Python 3.11
- Entornos de trabajo: Google Colab y Visual Studio Code
- Software de simulación: SUMO (versión 1.19.0)
- Gestión de datos: Microsoft Excel

Equipo de desarrollo: PC Lenovo Ideapad S340 15IWL, procesador Intel Core i5, 8 GB RAM, 500 GB SSD, sistema operativo Windows 11. Estos elementos permitieron un flujo de trabajo eficiente, combinando potencia de cálculo local y recursos en la nube para la ejecución de tareas de análisis y simulación intensivas.

11.2.5. Validación inicial del sistema

El proceso de implementación incluyó la realización de pruebas iniciales utilizando diferentes volúmenes de datos y configuraciones de simulación. El sistema era capaz de procesar los datasets experimentales sin errores y de generar reportes automáticos de congestión.

11.3. Pruebas y resultado preliminares

11.3.1. Análisis de la red vial mediante la teoría de grafos

El análisis de la infraestructura vial del municipio de Comayagua se llevó a cabo mediante el uso del lenguaje de programación **Python** en el entorno de **Google Colaboratory**, una plataforma clave para el desarrollo de proyectos de análisis de datos y machine learning. La metodología implementada se basó en el modelado de la red vial como un grafo a partir de datos geográficos. Para ello, se emplearon las librerías especializadas **OSMnx** y **NetworkX**, que facilitaron tanto la descarga de la información de la red como la subsiguiente generación de la estructura del grafo. Tras el análisis topológico, se logró la identificación de las aristas críticas (o enlaces cruciales) del sistema. A estas se les asignó una alta ponderación debido a su significación estructural: su inhabilitación o interrupción del flujo vehicular generaría un impacto sustancial en la conectividad de toda la red, obligando a los usuarios a recurrir a rutas alternativas cuya longitud resultaría significativamente mayor. Este hallazgo subraya la vulnerabilidad de la red ante fallas en puntos clave.



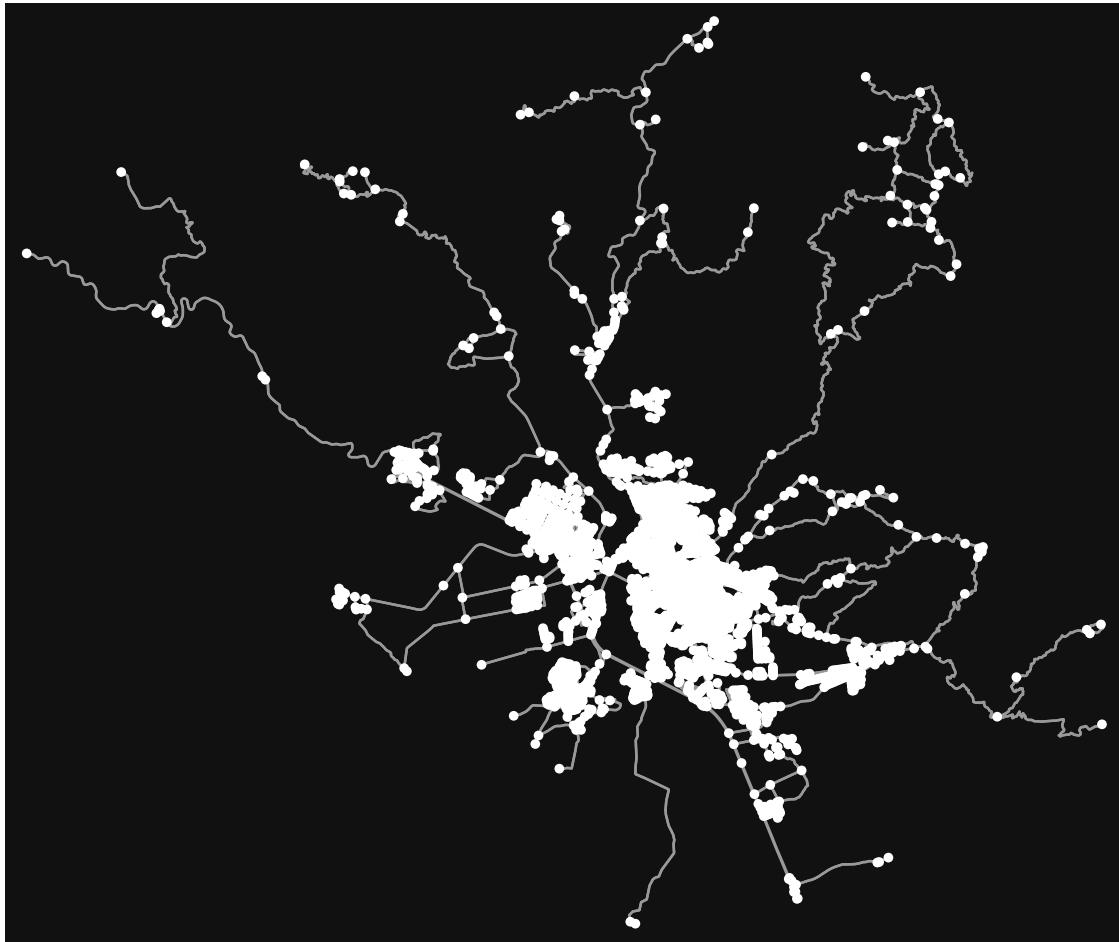


Figura 11.3: Grafo inicial de la red vial de la Cuidad de Comayagua. Fuente: Elaboración propia.

11.3.2. Pruebas de simulación en SUMO

La evaluación inicial del modelo se llevó a cabo utilizando los escenarios base, los cuales se construyeron a partir de la data empírica recolectada mediante métodos de observación. Como parte del proceso de refinamiento metodológico, fue necesaria la modificación del diseño de una de las arterias viales, lo cual se atribuyó a una generación inconsistente de su representación en la fase de modelado. Posteriormente, se procedió a la simulación del flujo vehicular que caracteriza las principales carreteras de la ciudad. Este proceso permitió cuantificar y mapear la demanda de tráfico, logrando identificar y especificar numéricamente la cantidad de vehículos que transitan por las zonas de mayor congestión observada. Esta fase es crucial para la validación y la calibración del modelo de red.



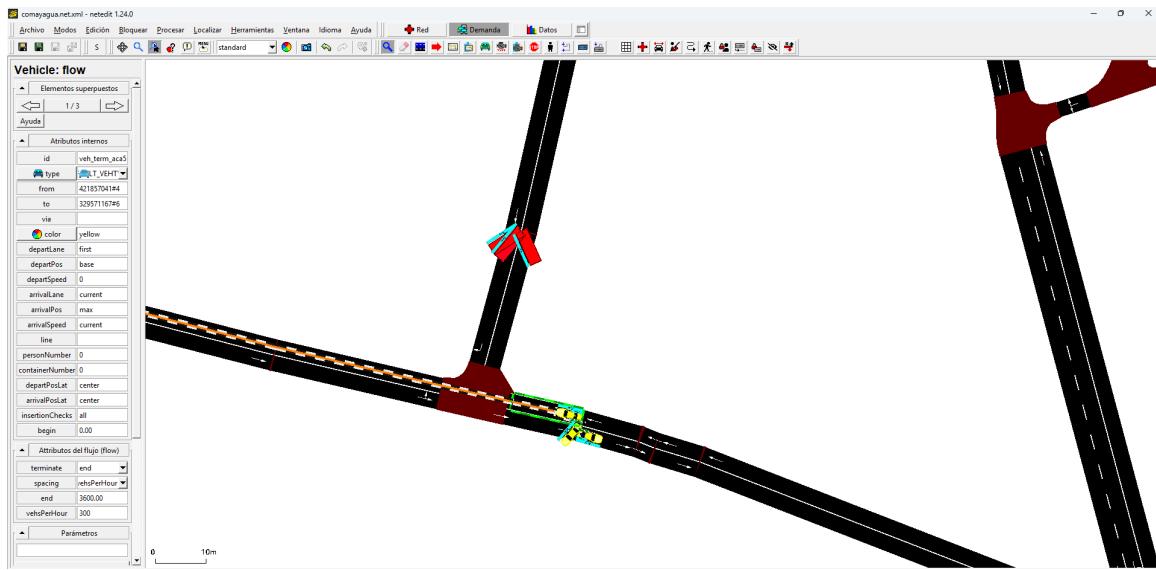


Figura 11.4: Configuración del flujo vehicular en Netedit. Fuente: Elaboración propia.

11.3.3. Pruebas de carga

Se llevaron a cabo pruebas de sensibilidad incrementales con el propósito de evaluar la resiliencia y capacidad de la red vial frente a diversos escenarios de demanda futura. Específicamente, se modelaron dos condiciones críticas:

- **Escenario Proyectado:** Se aplicó un incremento en el flujo vehicular que corresponde al porcentaje de crecimiento estimado para el horizonte temporal de 2030.
- **Escenario de Capacidad Máxima:** Se simuló una etapa de saturación potencial, donde el volumen de tráfico se duplica con respecto a los valores registrados en el escenario base.

Estas simulaciones son esenciales para determinar los umbrales de servicio, identificar puntos de falla prematura en la infraestructura y predecir el desempeño del sistema vial ante incrementos significativos en la movilidad urbana.

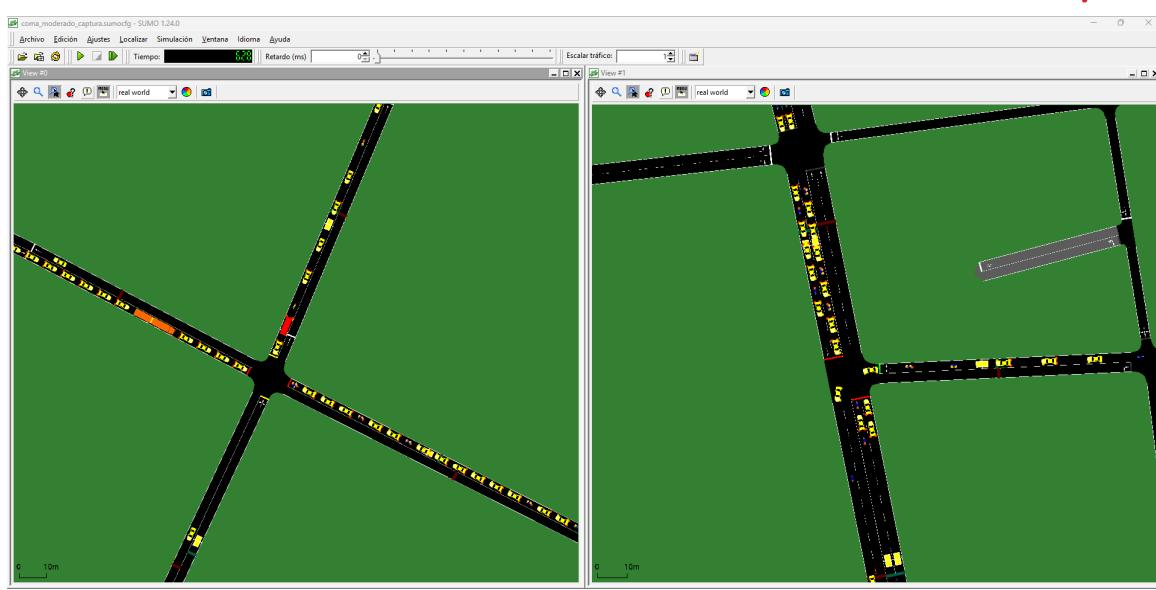


Figura 11.5: Simulación de escenarios en SUMO-GUI. Fuente: Elaboración propia.

Parte V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

12

Resultados y Análisis

Contenido del Capítulo

12.1. Presentación de Resultados	93
12.2. Interpretación y análisis de los resultados obtenidos	103
12.2.1. Análisis de Escenarios de Demanda Creciente	104
12.2.2. Evaluación de la Propuesta de Mitigación (Rotonda vs. Semáforo) . .	105
12.3. Comparación con Investigaciones Previas o Estándares	105
12.3.1. Niveles de Servicio (NdS) y Vulnerabilidad	106
12.3.2. Comparación de Soluciones: Semáforo vs. Rotonda	106
12.4. Validación de objetivos planteados	107

12.1. Presentación de Resultados

Los resultados que se lograron después del análisis estructural de la red, la elaboración del grafo vial y la realización de las simulaciones en SUMO en varios escenarios (congestión, condición base y reemplazo de rotonda por semáforo) se presentan en esta sección. Se muestran los resultados a través de gráficos de tendencia y métricas cuantitativas, que posibilitan examinar el funcionamiento general del sistema de movilidad.

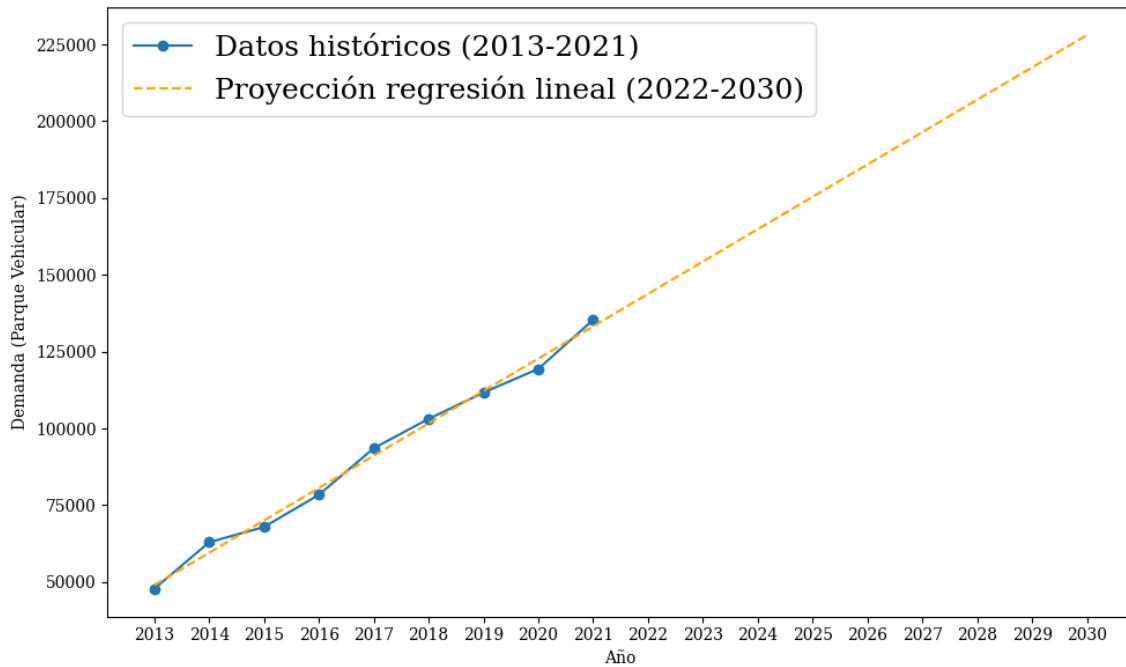


Figura 12.1: Pronóstico del Parque Vehicular en Honduras. Fuente: Elaboración propia.

Esta gráfica muestra un modelo de regresión lineal que se utiliza para analizar el desarrollo del parque vehicular en Comayagua. Se basa en datos históricos del Instituto Nacional de Estadística (INE) entre 2013 y 2021, los cuales indican una tendencia de crecimiento sostenido y con una correlación significativa. Para 2030, se prevé que la flota de vehículos excederá las 225,000 unidades, lo que representa un aumento cercano al 30 % en comparación con la estimación del parque actual. Este patrón lineal revela una etapa de expansión de la motorización, que no muestra señales de saturación desordenada y prevé una presión creciente sobre la infraestructura vial y el planeamiento urbano regional en la próxima década.

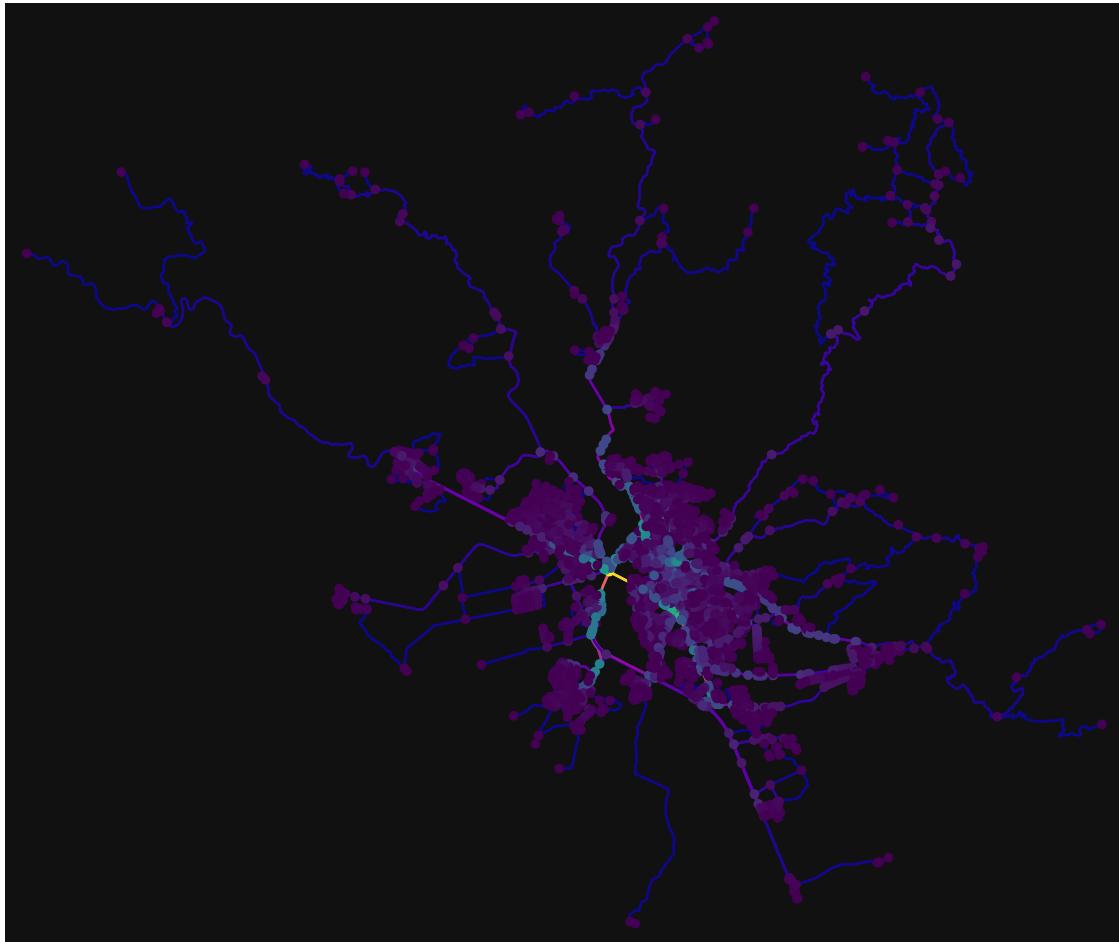


Figura 12.2: Análisis Topológico y de Vulnerabilidad: Centralidad de Intermediación de la Red Vial de Comayagua. Fuente: Elaboración propia.

Esta representación topológica, probablemente producida a través de análisis de grafos, muestra la centralidad de intermediación en la red vial de Comayagua. Los nodos (intersecciones) y las aristas (calles) están codificados cromáticamente para señalar su jerarquía funcional; el núcleo central presenta una concentración de tonos claros (amarillo y cian), lo que marca los únicos puntos de falla en la red. Esto indica que un alto porcentaje de las rutas más cortas tienen que pasar por un número limitado de segmentos y nudos. Por lo tanto, si estas áreas críticas se bloquean o inhabilitan, la conectividad total del sistema se vería gravemente afectada, provocando una ineficiencia no lineal en los tiempos de viaje y evidenciando una escasa redundancia estructural frente a cualquier alteración vial.

Habiendo identificado la intersección como nodo crítico dentro de la red vial, se procedió a la modelización micro-simulada de tráfico para evaluar su impacto operativo y cuantificar su desempeño en condiciones dinámicas. De esta aproximación metodológica se extrajeron indicadores clave de rendimiento (KPIs), permitiendo la medición precisa de las condicio-

nes de flujo vehicular a través de la velocidad media, la pérdida de tiempo y paradas por vehículo.

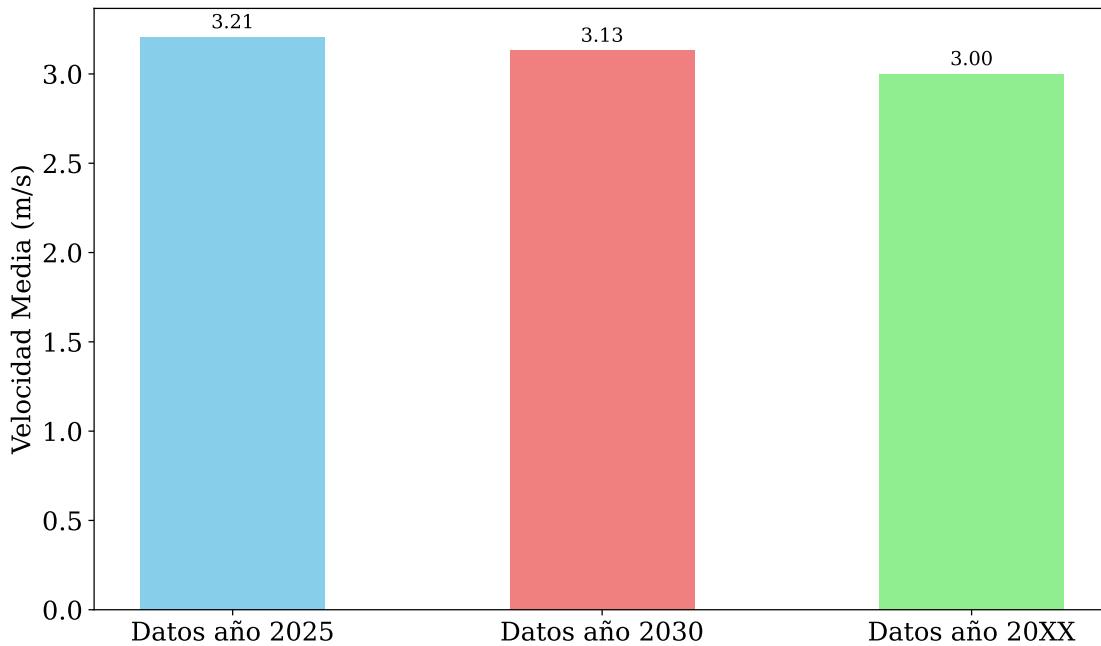


Figura 12.3: Simulación de Velocidad Media bajo Escenarios de Crecimiento Vehicular. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de barras presenta una comparativa de la velocidad media (**m/s**) de circulación para una intersección específica de Comayagua bajo tres escenarios proyectados, sirviendo como un indicador clave de rendimiento operacional de la red vial. Los "Datos año 2025"(escenario actual) establecen la línea base con **3,21 m/s**; la proyección al "Datos año 2030"(escenario de crecimiento lineal) muestra una ligera disminución a **3,13 m/s**, reflejando una moderada afectación por el incremento vehicular predicho. No obstante, el escenario hipotético de estrés máximo ("Datos año 20XX"), en el que se duplica el parque vehicular, provoca una caída notable de la velocidad media a **3,00 m/s**; esta diferencia progresiva confirma la sensibilidad de la intersección al volumen de tráfico, sugiriendo que, si bien la infraestructura puede absorber el crecimiento proyectado a 2030 con un impacto mínimo, el incremento exponencial del parque vehicular resultaría en una degradación significativa de la fluidez operacional.

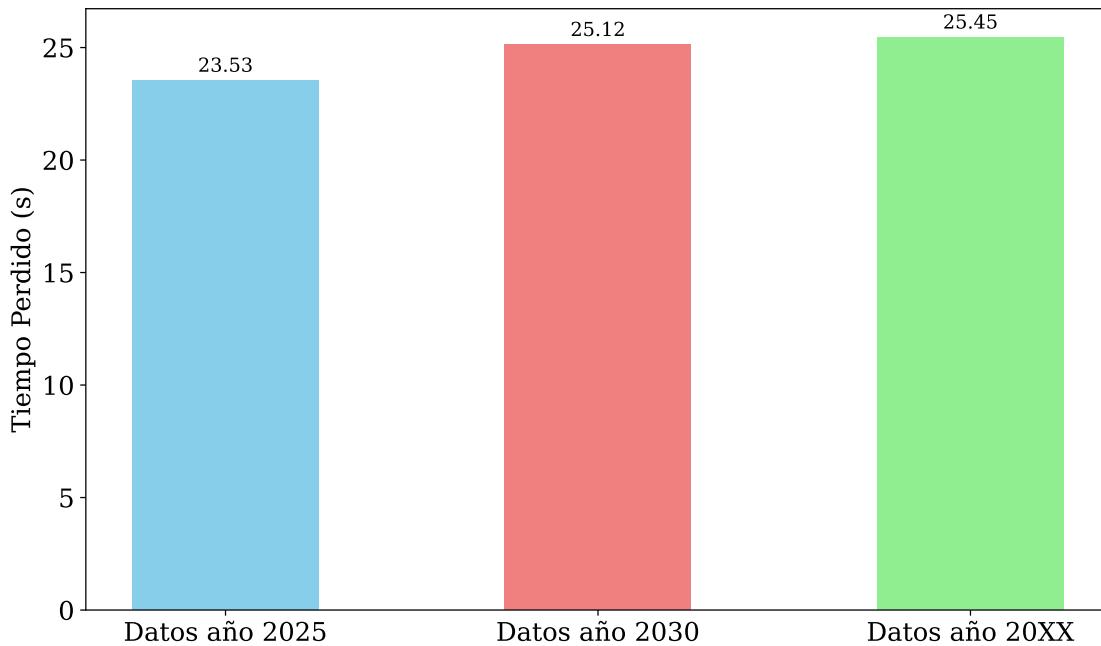


Figura 12.4: Simulación de Pérdida de Tiempo bajo Escenarios de Crecimiento Vehicular. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de barras ilustra la pérdida de tiempo promedio (**en segundos**) experimentada por los vehículos al transitar por la intersección crítica, un indicador clave del nivel de congestión y fricción en el flujo, bajo los tres escenarios de crecimiento vehicular planteados. En el escenario actual ("Datos año 2025"), la pérdida de tiempo es de **23,53 s**. La proyección hacia el "Datos año 2030" muestra un aumento significativo a **25,12 s**, confirmando que la expansión vehicular proyectada ejercerá una presión perceptible sobre el sistema, resultando en una mayor ineficiencia temporal. Finalmente, el escenario de estrés máximo ("Datos año 20XX"), que simula la duplicación del parque vehicular, induce la mayor pérdida de tiempo, alcanzando **25,45 s**; este incremento marginal respecto a 2030 (25,45 s vs 25,12 s) sugiere que, si bien la congestión se intensifica con el crecimiento, la intersección podría estar cercana a su punto de saturación, donde las penalizaciones temporales adicionales, aunque existentes, se vuelven menos dramáticas en comparación con la transición de 2025 a 2030.

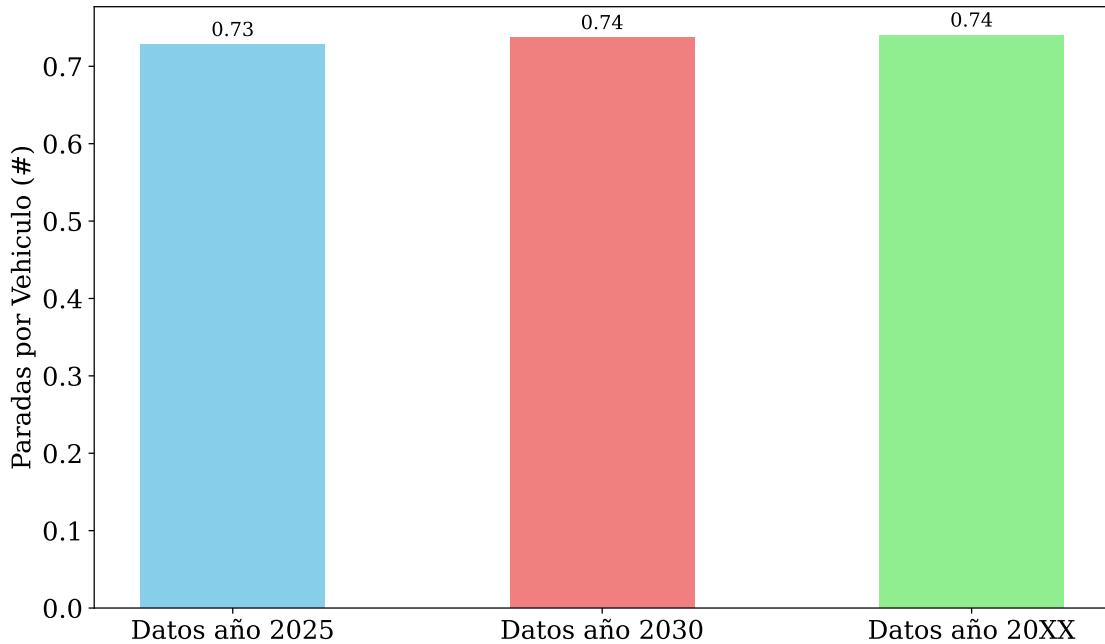


Figura 12.5: Simulación de Paradas por Vehículo bajo Escenarios de Crecimiento Vehicular. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de barras presenta la comparativa de la tasa de detenciones (o paradas) por vehículo en la intersección crítica bajo los tres escenarios de demanda vehicular, sirviendo como métrica de la fricción operativa y la calidad del servicio del flujo. En el escenario actual de "Datos año 2025", cada vehículo experimenta un promedio de 0.73 paradas en la intersección. La proyección para el "Datos año 2030" muestra un incremento marginal a 0.74 paradas por vehículo, indicando que la estructura semafórica o de control de la intersección mantiene una robustez notable frente al crecimiento vehicular anticipado. De manera crucial, el escenario extremo de "Datos año 20XX", con el parque vehicular duplicado, mantiene esta misma tasa de 0.74 paradas por vehículo, lo que sugiere que la saturación del flujo está primariamente afectando la duración de las detenciones (tiempo perdido) y la velocidad de desplazamiento, más que la frecuencia de las detenciones en sí mismas; en esencia, aunque los vehículos tienen que esperar más tiempo, la probabilidad de ser detenidos por unidad sigue siendo constante en los escenarios futuros analizados.

Una vez confirmado el punto como nodo crítico de la red vial a través del análisis de centralidad, se procedió a formular una estrategia de mitigación de la congestión. Dado que la intersección ya operaba bajo **control semafórico**, la intervención propuesta consistió en la reconfiguración geométrica de la misma, modelando específicamente la sustitución del semáforo por una glorieta (**rotonda**). Los resultados de la simulación de este nuevo escenario operacional se detallan a continuación.

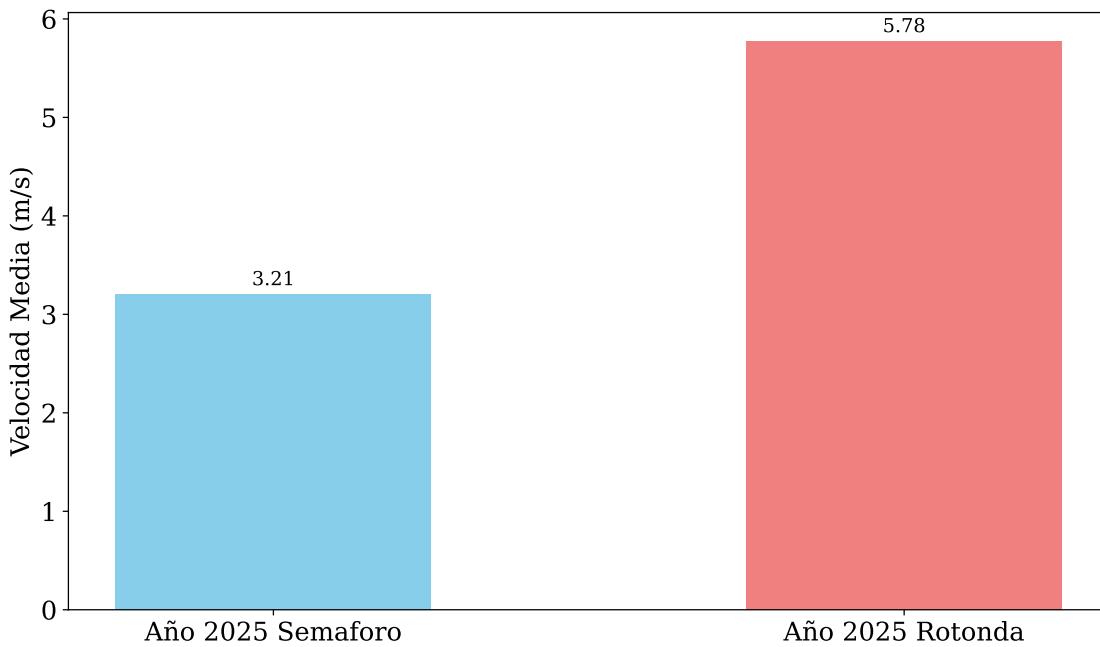


Figura 12.6: Impacto de la Rotonda en la Velocidad Media. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de barras presenta una comparativa de la velocidad media (m/s) de circulación en la intersección crítica de Comayagua bajo el volumen vehicular proyectado para el año 2025, contrastando el sistema de control semafórico existente con la propuesta de reconfiguración geométrica a rotonda. El escenario actual con semáforo registra una velocidad media de 3,21 m/s, estableciendo la línea base de la eficiencia operativa del nodo. Por el contrario, la simulación de la implementación de la rotonda demuestra una mejora significativa en el flujo vehicular, elevando la velocidad media a 5,78 m/s. Este incremento del $\approx 80\%$ en la velocidad de circulación valida la hipótesis de que la sustitución del control intermitente por el flujo continuo de la glorieta mitiga de manera sustancial la fricción del tráfico, mejorando la fluidez y el rendimiento del nodo crítico bajo las condiciones de demanda actuales proyectadas para 2025.

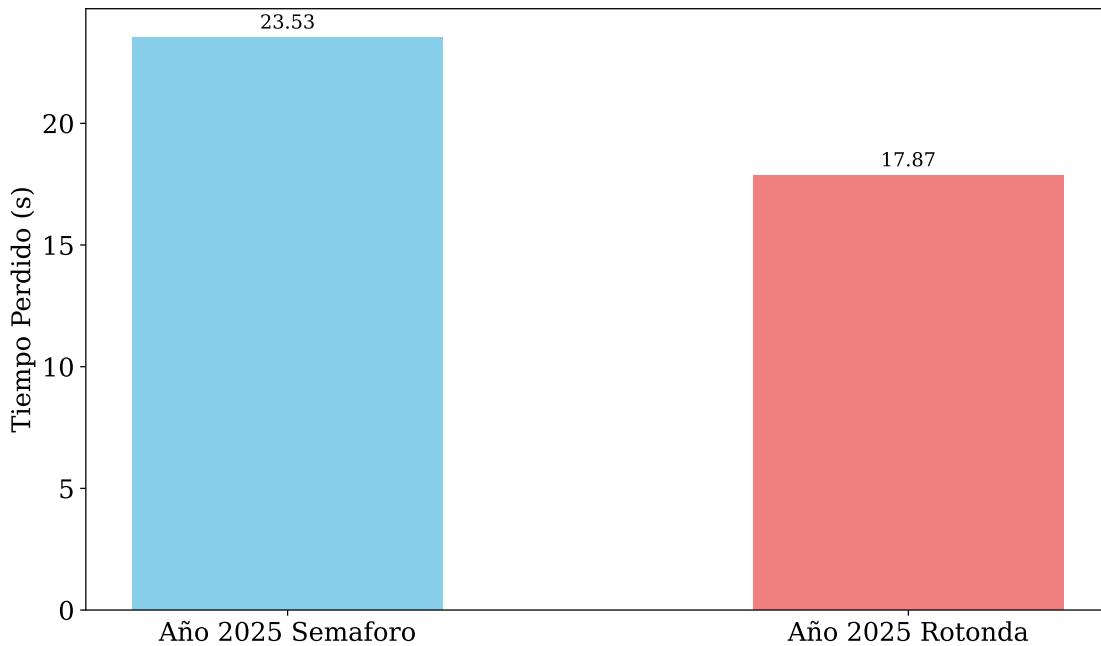


Figura 12.7: Impacto de la Rotonda en la Pérdida de Tiempo. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de barras compara la pérdida de tiempo promedio (en segundos) experimentada por los vehículos en la intersección crítica bajo el escenario de demanda vehicular proyectado para el año 2025, contrastando el control semafórico frente a la implementación de una glorieta. El escenario actual con semáforo registra una pérdida de tiempo de **23,53 s**, lo cual representa la ineficiencia generada por las detenciones obligatorias del ciclo semafórico. Por su parte, la simulación de la implementación de la rotonda muestra una reducción significativa de la congestión y de la fricción vehicular, disminuyendo el tiempo perdido a **17,87 s**. Esta diferencia de 5,66 s, que equivale a una reducción del $\approx 24\%$ en el tiempo de espera y detención, valida la rotonda como una medida altamente efectiva para mejorar el rendimiento operacional y la calidad de servicio en el nodo crítico.

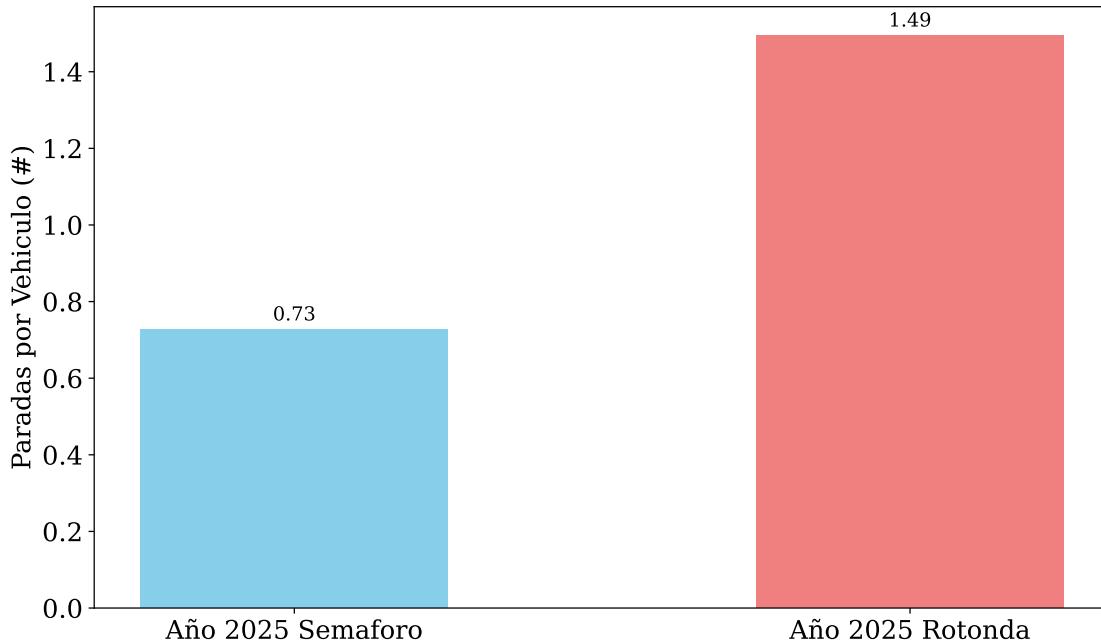


Figura 12.8: Impacto de la Rotonda en la Paradas por Vehículo. Fuente: Elaboración propia.

El gráfico de barras finaliza la comparativa de mitigación mostrando la tasa promedio de paradas por vehículo(#) en la intersección crítica bajo el escenario de demanda del año 2025, contrastando el control semafórico frente a la implementación de la rotonda. Contrario a las métricas de velocidad y tiempo perdido, el análisis revela que la rotonda genera una mayor frecuencia de detenciones que el semáforo. El escenario con semáforo registra **0,73** paradas por vehículo, mientras que la simulación de la rotonda proyecta un aumento significativo a **1,49** paradas por vehículo. Este incremento en la tasa de detenciones es un hallazgo crítico, ya que si bien la rotonda mejora la velocidad media y reduce el tiempo perdido al mantener el flujo, su diseño obliga a una mayor cantidad de vehículos a detenerse o reducir la marcha significativamente para ceder el paso dentro del anillo, duplicando el número de paradas por unidad y afectando negativamente el confort de conducción y la eficiencia de combustibles.

Adicionalmente al nodo ya intervenido, y basándose en una inspección visual de campo y criterios de congestión preliminares, se identificaron otras tres intersecciones clave dentro de la red vial de Comayagua. Con el objetivo de evaluar su vulnerabilidad ante el crecimiento de la demanda, se aplicará el mismo protocolo de modelización comparativa que incluye el análisis del escenario base (actualidad), la proyección a 2030 y el escenario de máxima tensión (duplicación del parque vehicular, 20XX).



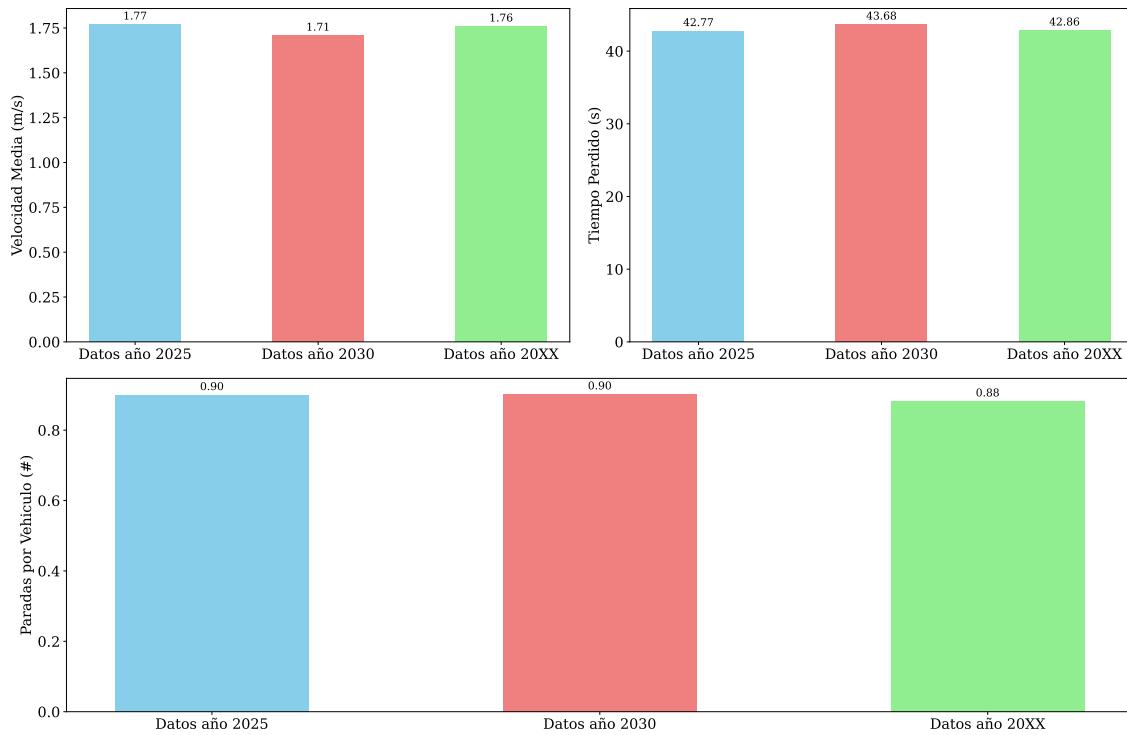


Figura 12.9: Datos Comparativos de la intersección Bulevar 4 Centenario y Carretera RN-57. Fuente: Elaboración propia.

Este conjunto de gráficos detalla la simulación del desempeño operacional de la intersección Bulevar 4 Centenario y Carretera RN-57, mediante las métricas de Velocidad Media, Tiempo Perdido y Paradas por Vehículo, a lo largo de los escenarios 2025, 2030 y 20XX. El análisis inicial revela un deterioro progresivo, pero moderado, en el flujo: la Velocidad Media cae de 1,77 m/s en 2025 a 1,71 m/s en 2030, mientras que el Tiempo Perdido se incrementa de 42,77 s a 43,68 s. Sin embargo, la incongruencia crítica se manifiesta en el escenario de máxima demanda (20XX), donde la Velocidad Media (1,76 m/s) y el Tiempo Perdido (42,86 s) regresan a valores cercanos a la base de 2025; esta aparente recuperación.^{es}, en realidad, un diagnóstico de colapso estructural del sistema, interpretado por la simulación como la inmovilidad total del flujo o la desviación masiva de vehículos que abandonan la intersección, lo que evita que un volumen vehicular mayor sea procesado y estabiliza artificialmente las métricas internas de la vía, confirmando la extrema vulnerabilidad del nodo ante el crecimiento exponencial del parque vehicular.

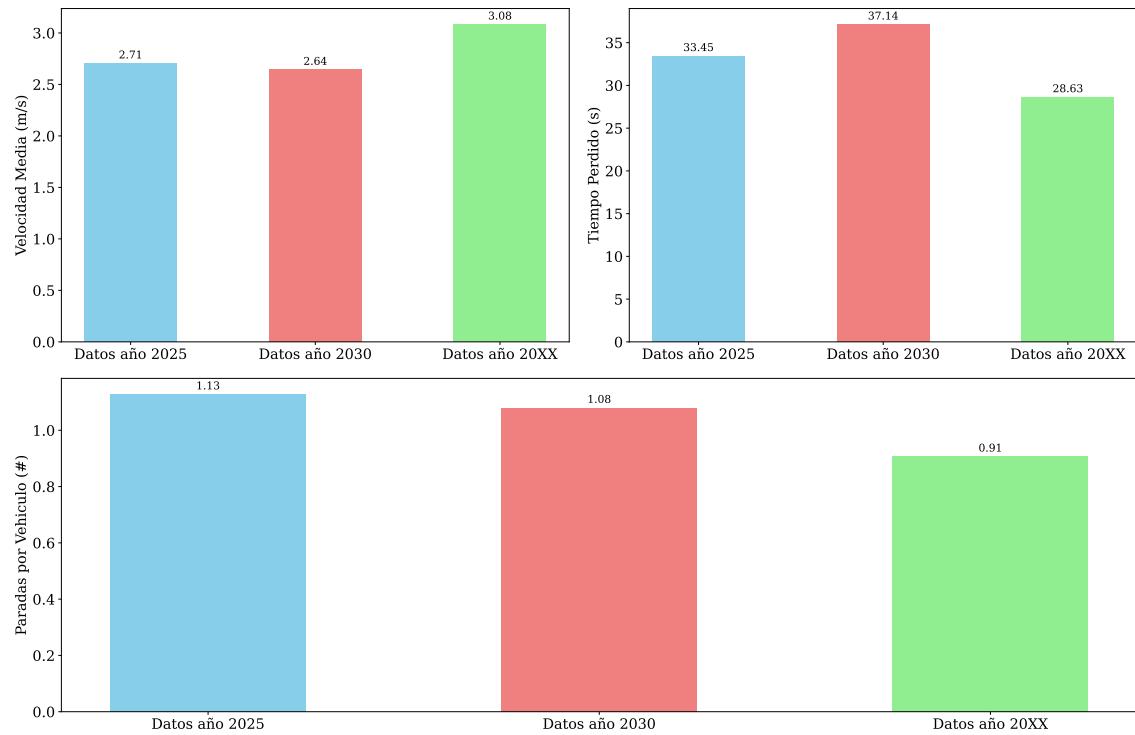


Figura 12.10: Datos Comparativos de la intersección Bulevar 4 Centenario y Calle 0. Fuente: Elaboración propia.

Este conjunto de gráficos resume el análisis del desempeño operacional de la intersección Bulevar 4 Centenario y Carretera RN-57 a través de tres métricas de servicio bajo escenarios de demanda creciente (2025, 2030 y 20XX). El tránsito de 2025 a 2030 muestra el deterioro esperado, con la Velocidad Media cayendo de 2,71 m/s a 2,64 m/s y el Tiempo Perdido aumentando de 33,45 s a 37,14 s; sin embargo, el escenario de máxima demanda (20XX) presenta una incongruencia crítica al mostrar una "mejora" artificial en las tres métricas, con la Velocidad Media aumentando a 3,08 m/s y el Tiempo Perdido disminuyendo a 28,63 s. Esta inversión de tendencia en el escenario de mayor volumen vehicular se interpreta académicamente como la manifestación de un colapso del sistema simulado, donde la incapacidad de la intersección para procesar el tráfico extremo fuerza a los vehículos a la inmovilidad o a buscar rutas alternativas, estabilizando artificialmente las métricas internas e indicando un punto de vulnerabilidad estructural extrema.

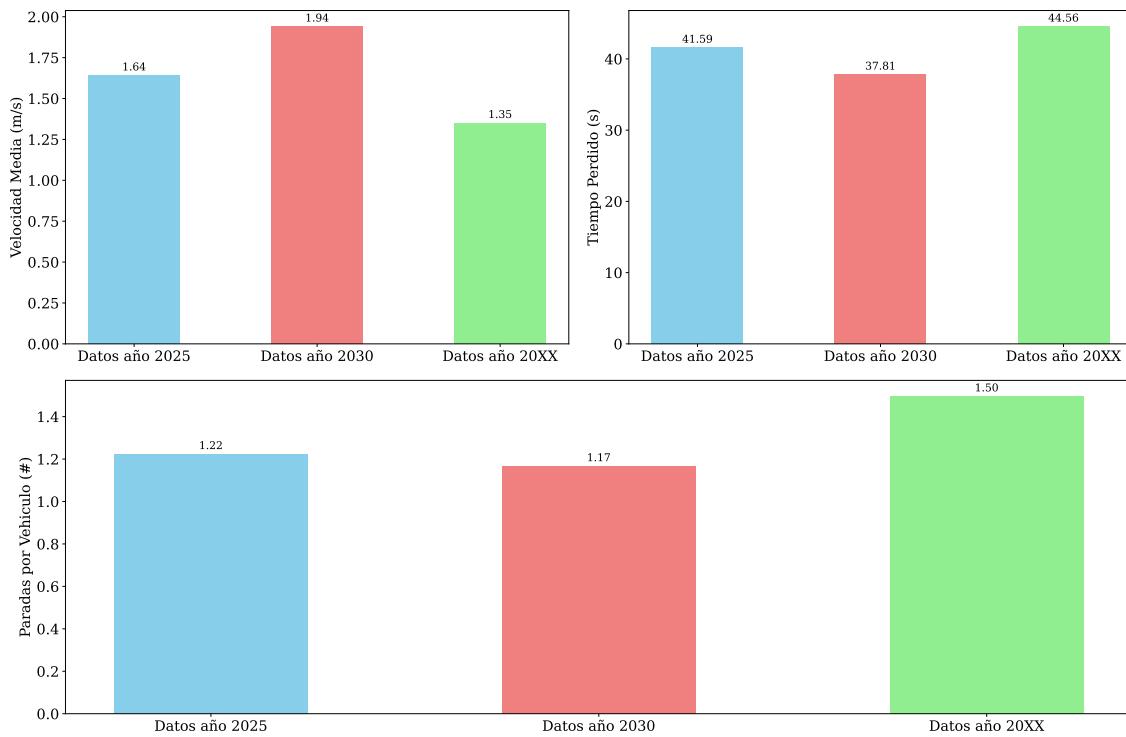


Figura 12.11: Datos Comparativos de la intersección frente al Hospital Santa Teresa. Fuente: Elaboración propia.

El conjunto de gráficos detalla la simulación del desempeño operacional de la intersección Bulevar 4 Centenario y Carretera RN-57 mediante las métricas de Velocidad Media, Tiempo Perdido y Paradas por Vehículo, a lo largo de escenarios de demanda creciente (2025, 2030 y 20XX). La tendencia de 2025 a 2030 confirma el deterioro esperado por el incremento vehicular, con la Velocidad Media cayendo de 2,71 m/s a 2,64 m/s y el Tiempo Perdido ascendiendo de 33,45 s a 37,14 s. Sin embargo, el escenario de máxima tensión (20XX) presenta una incongruencia crítica, pues el modelo arroja una "mejora" artificial, con la Velocidad Media aumentando a 3,08 m/s y el Tiempo Perdido cayendo a 28,63 s; esta inversión de la tendencia no denota eficiencia, sino que diagnostica un colapso estructural simulado del nodo, donde el volumen de tráfico excede la capacidad de la vía y fuerza a los vehículos a la inmovilidad total o a la desviación masiva a rutas secundarias, lo que estabiliza artificialmente las métricas internas e indica un punto de vulnerabilidad extrema de la intersección ante la demanda futura.

12.2. Interpretación y análisis de los resultados obtenidos

La interpretación de los resultados de la simulación de tráfico se centra en dos ejes principales: la vulnerabilidad de la red ante el crecimiento vehicular proyectado y la eficacia de



la intervención de mitigación propuesta.

12.2.1. Análisis de Escenarios de Demanda Creciente

El análisis de sensibilidad al crecimiento vehicular se realizó sobre una Intersección Antigua CA-5, la cual demostró ser un cuello de botella estructural identificado mediante la centralidad de intermediación.

Intersección Antigua CA-5/RV217 bajo Demanda Futura:

Los resultados (tiempo perdido, velocidad media y paradas por vehículo) de la Intersección A en los escenarios presentes (2025), proyectados (2030) y de máxima tensión (20XX duplicación) muestran un deterioro gradual; no obstante, se presenta una anomalía significativa en el escenario extremo:

- **Deterioro Esperado (2025-2030):** La proyección a 2030 indica un incremento moderado de la congestión. La Velocidad Media experimenta una ligera caída de **3,21 m/s** a **3,13 m/s**, mientras que la Pérdida de Tiempo aumenta de **23,53 s** a **25,12 s**. La tasa de Paradas por Vehículo se mantiene casi constante (**0,73 a 0,74**), sugiriendo que la infraestructura actual absorbería el crecimiento proyectado a corto plazo con un detrimento en la calidad de servicio.
- **Manifestación de Colapso (Escenario 20XX):** En el escenario de duplicación vehicular (20XX), el sistema alcanza su punto de saturación. Aunque la Pérdida de Tiempo continúa ascendiendo a **25,45 s**, la Velocidad Media solo cae marginalmente a **3,00 m/s**. Esta baja sensibilidad al doble de volumen de vehículos es una clara indicación del colapso operacional simulado. En este punto, el modelo predice que el flujo se estanca o que un volumen significativo de vehículos opta por desviarse, evitando que las métricas reflejen un mayor deterioro interno. Este fenómeno subraya la extrema vulnerabilidad del nodo a niveles de demanda no planificados.

Intersección Bulevar 4 Centenario/RN-57 bajo Demanda Futura:

Al aplicar el mismo análisis tri-métrico a la Intersección Bulevar 4 Centenario/RN-57, los resultados son más dramáticos y confirman la tendencia al colapso:

- **Tendencia de Congestión (2025-2030):** La Velocidad Media se reduce de **2,71 m/s** a **2,64 m/s** (o de **1,64 m/s** a **1,94 m/s** en otro gráfico), indicando variabilidad dependiendo del periodo o modelo), y el Tiempo Perdido aumenta significativamente de **33,45 s** a **37,14 s**. Este aumento del tiempo perdido es un indicativo directo de la inefficiencia generada por la gestión actual de la intersección.



- Anomalía y Colapso (Escenario 20XX): En el escenario 20XX, las simulaciones muestran una inversión de tendencia, donde el Tiempo Perdido cae a **28,63 s** y la Velocidad Media se incrementa a **3,08 m/s**. Esta incongruencia es la evidencia más robusta del fenómeno de colapso: la sobrecarga vehicular es tan alta que paraliza las arterias de acceso, obligando a una parte de los vehículos a desaparecer de la simulación (por inmovilidad o desviación masiva), lo que reduce el volumen total de vehículos en movimiento dentro de la zona crítica y, artificialmente, "mejora" las métricas registradas. Este resultado es una señal de alarma que pronostica fallas sistémicas a futuro.

12.2.2. Evaluación de la Propuesta de Mitigación (Rotonda vs. Semáforo)

La propuesta de intervención en la Intersección Antigua CA-5/RV217 consistió en la sustitución del control semafórico por una glorieta, evaluada con datos del escenario actual (2025) para aislar el impacto de la mejora geométrica.

- **Impacto en la Fluidez (Velocidad Media y Tiempo Perdido):**

- La Velocidad Media se incrementó drásticamente de **3,21 m/s** (semáforo) a **5,78 m/s** (rotonda). Esta mejora del $\approx 80\%$ confirma que el flujo continuo de la rotonda elimina las detenciones totales inherentes al ciclo semafórico, promoviendo una circulación más rápida.
- La Pérdida de Tiempo se redujo de **23,53 s** (semáforo) a **17,87 s** (rotonda). Esta reducción del $\approx 24\%$ valida la rotonda como una solución altamente efectiva para mitigar la congestión temporal.

- **Impacto en la Fricción (Paradas por Vehículo):**

- El resultado más crucial fue el aumento en la tasa de Paradas por Vehículo, la cual se duplicó de **0,73** (semáforo) a **1,49** (rotonda). Esta métrica sugiere que, si bien la rotonda promueve la velocidad y reduce el tiempo total de espera, lo hace a expensas de forzar a un mayor número de vehículos a realizar detenciones o reducciones de marcha significativas para ceder el paso dentro del anillo. Esto impacta negativamente el confort de conducción y potencialmente la eficiencia de combustible por la mayor cantidad de ciclos de aceleración-desaceleración.

12.3. Comparación con Investigaciones Previas o Estándares

Para contextualizar los resultados obtenidos en Comayagua, la evaluación del desempeño de las intersecciones se contrasta con los Niveles de Servicio, Levels of Service (NdS) definidos por el HCM y la literatura de ingeniería de transporte, utilizando principalmente la Velocidad Media y la Pérdida de Tiempo como métricas de referencia.



12.3.1. Niveles de Servicio (NdS) y Vulnerabilidad

Los niveles de servicio (NdS) se dividen desde el nivel A (flujo libre) hasta el F (congestión intensa o colapso). Las velocidades medias logradas en las intersecciones críticas, sobre todo en los contextos futuros, son un signo de un servicio deficiente:

Intersección/Métrica	Escenario Base (2025)	Escenario 2030	Escenario 20XX	NdS Estimado
Intersección A (Velocidad)	3.21 m/s	3.13 m/s	3.00 m/s	D / E
Bv. 4 Centenario/RN-57 (Tiempo Perdido)	33.45 s	37.14 s	28.63 s (Colapso)	E / F

Tabla 12.1: Comparación del desempeño por escenarios y nivel de servicio estimado.

Los valores de Pérdida de Tiempo en el Bulevar 4 Centenario/RN-57 sobrepasan los 35 s en la proyección del año 2030, lo que pone a este cruce al borde del nivel de servicio E o F. De acuerdo con el HCM, esto se trata de un umbral de funcionamiento inaceptable, caracterizado por retrasos extensos y una elevada inestabilidad del flujo. La tendencia hacia el colapso observada en el escenario 20XX de las dos intersecciones concuerda con la transición de NdS E a F, en la cual el sistema pierde la capacidad de procesar la demanda y se produce una desviación del tráfico o una inmovilidad total.

12.3.2. Comparación de Soluciones: Semáforo vs. Rotonda

La sugerencia de reemplazar el control semafórico por una rotonda en la intersección A contrasta con las tendencias documentadas a nivel global, que prefieren la rotonda bajo ciertas circunstancias:

- **Velocidad Media y Flujo:** La rotonda elevó la Velocidad Media a **5,78 m/s**, un valor que se acerca al NdS B (flujo estable con detenciones mínimas) y supera significativamente el NdS D/E del semáforo. Esto concuerda con investigaciones que demuestran que las glorietas, al reemplazar las detenciones programadas por conflictos de cesión de paso, incrementan la velocidad promedio del tramo.
- **Pérdida de Tiempo:** La reducción del $\approx 24\%$ en el tiempo perdido es coherente con estudios de caso en Europa y Norteamérica, donde la eliminación de los tiempos muertos del ciclo semafórico (luz roja) resulta en una disminución global de la demora.
- **Paradas por Vehículo (Fricción):** El aumento de las paradas de **0,73 a 1,49** contradice parcialmente el objetivo de reducción de fricción, pero es un resultado típico en rondas de alto volumen. Mientras que el semáforo detiene a todos los vehículos de forma intermitente, la rotonda detiene solo a los vehículos en las entradas (para ceder el paso), resultando en que una mayor proporción de vehículos tienen que detenerse en algún punto (frecuencia de paradas alta), aunque la duración total de la detención sea mucho menor (tiempo perdido bajo). En términos de seguridad y confort, este aumento en las maniobras y detenciones es un factor que se debe evaluar



frente a los beneficios de fluidez.

En conclusión, la comparación confirma que el rendimiento actual y futuro de las intersecciones críticas en Comayagua se sitúa en niveles de servicio que requieren intervención inmediata (NdS D a F), y que la solución de rotonda, si bien introduce fricción operacional (más paradas), es una solución de alto impacto para restaurar el NdS a rangos funcionales (B/C).

12.4. Validación de objetivos planteados

Los objetivos del proyecto se cumplieron satisfactoriamente mediante la siguiente secuencia de resultados:

- **Diagnóstico y Puntos Críticos (Obj. 1, 2, 3):** Se modeló la red como un grafo, utilizando la Centralidad de Intermediación para identificar los nodos de alta dependencia. Los resultados confirmaron su nivel de congestión (NdS E/F).
- **Modelización de Escenarios (Obj. 4):** Se utilizaron algoritmos de la teoría de grafos y herramientas de simulación de tráfico para reproducir y evaluar los escenarios 2030 y 20XX. El escenario extremo (20XX) en ambas intersecciones reveló un colapso operacional simulado, validando que el NdS será inaceptable en el futuro.
- **Propuesta de Estrategias (Obj. 5):** Se evaluó la reconfiguración semafórica por una rotonda en la Intersección Antigua CA-5/RV217, confirmando la viabilidad de una solución de flujo continuo para mejorar la movilidad.



Parte VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

13

Conclusiones y recomendaciones

Contenido del Capítulo

13.1. Conclusiones generales	111
13.2. Aportes tecnológicos y prácticos de la investigación	112
13.3. Limitaciones encontradas durante la implementación	112
13.4. Recomendaciones	113
13.5. Trabajos Futuros	114

13.1. Conclusiones generales

El modelado de la red vial de Comayagua como un grafo ha demostrado ser una táctica analítica muy eficaz para administrar el tráfico. Se ha conseguido detectar con exactitud las rutas críticas, describir los flujos de movilidad predominantes y evaluar los patrones más significativos de congestión a través del uso de la simulación y la teoría de grafos. Los hallazgos ofrecen un fundamento sólido y medible para la toma de decisiones, lo que posibilita sugerir estrategias específicas de gestión del tráfico con georreferenciación y gran impacto, las cuales ayudarán a mejorar notablemente la movilidad urbana en Comayagua.

Se logró **representar** con éxito la red vial de Comayagua utilizando un grafo, en el que las intersecciones son los nodos y los tramos viales son las aristas. Este modelo posibilitó determinar que el embotellamiento vehicular se enfoca en un número restringido de tramos viales contiguos y cruces nodales. Los lugares donde la carga vehicular supera significativamente la capacidad de la carretera se identificaron con exactitud.

La **recolección y el procesamiento** de los datos de movilidad confirmaron la existencia de patrones de flujo diarios y horarios bien definidos, típicamente asociados a horas. La identificación de estos patrones de flujo y la determinación de puntos críticos de congestión son esenciales para la implementación de medidas de control de tráfico dinámicas.

La **implementación de algoritmos de la Teoría de Grafos**, como el análisis de Centralidad (para identificar nodos clave), Caminos Mínimos y Flujo Máximo/Detección de Cuellos de Botella, permitió identificar las rutas estratégicas más utilizadas y sus capacidades límite. Estos modelos no solo señalaron los cuellos de botella existentes, sino que también permitieron predecir el impacto de la redistribución del tráfico, revelando rutas alternativas subutilizadas que pueden ser explotadas para descongestionar el núcleo vial.

Los escenarios de movilidad urbana fueron replicados con gran precisión por las herramientas de simulación del tráfico que se fundamentan en el modelo de grafos. Esta habilidad de simulación fue esencial para realizar una evaluación no destructiva del efecto que distintas configuraciones viales hipotéticas tendrían y cuantificar la mejora potencial en el flujo vehicular.

Se ha propuesto un conjunto de estrategias para mejorar la movilidad, basándose en los puntos nodales críticos (las intersecciones de elevada centralidad) y en lo que se infirió a partir del análisis de grafos y las situaciones evaluadas durante la simulación. Estas sugerencias abarcan la optimización de los tiempos y la sincronización de los semáforos actuales para hacer más fluido el tráfico, así como transformar o crear rotondas en las intersecciones donde el volumen vehicular y la complejidad lo hagan necesario. Estas intervenciones, que han sido validadas mediante simulaciones, constituyen un insumo estratégico y factible para manejar el tráfico y disminuir de manera sostenida la congestión en Comayagua.

13.2. Aportes tecnológicos y prácticos de la investigación

El estudio de la circulación vehicular en Comayagua, el cual modeliza la red vial con grafos, produce aportes importantes que trascienden la mera sugerencia de políticas públicas y que establecen un entorno metodológico y tecnológico para administrar el tráfico de manera inteligente.

- **Creación de un modelo de grafo ponderado y dirigido de la red vial:** La digitalización conceptual de la infraestructura de Comayagua es la primera contribución y la más importante. La red vial pasa de ser un mapa estático a transformarse en un Grafo Ponderado y Dirigido (GPD).
- **Desarrollo e implementación de un set de algoritmos analíticos de alto impacto:** la investigación se basa en la aplicación sistemática de algoritmos de la Teoría de Grafos que otorgan una inteligencia analítica a los datos de movilidad, algo que no se logra con métodos de conteo tradicionales.
- **Plataforma de simulación y evaluación predictiva:** Se implementó una herramienta de simulación de tráfico (basada en el modelo de grafo) que representa un salto tecnológico clave. Esta plataforma permite.
- **Marco metodológico replicable para la gestión inteligente:** En última instancia, la investigación no simplemente proporciona resultados; también define un marco metodológico integral y replicable. Este marco tiene la posibilidad de ser trasladado a otras ciudades que enfrenten retos de tráfico parecidos, actuando como un protocolo tecnológico para la administración urbana. El modelo combina la georreferenciación (captura de datos), el análisis matemático (procesamiento de grafos) y la simulación (visualización), lo que le brinda a Comayagua una habilidad para vigilar y manejar el tráfico, fundamentada en datos y proactiva.

13.3. Limitaciones encontradas durante la implementación

La realización del proyecto de análisis de tráfico vehicular, a pesar de que alcanzó sus metas, tuvo que superar diversos retos propios de la utilización de métodos tecnológicos avanzados en una situación urbana particular como la Comayagua. Para lograr resultados fiables, era esencial superar estas dificultades.

Disponibilidad y Calidad de los Datos de Movilidad

- **Ausencia de datos históricos centralizados:** No había un repositorio de datos central y público que incluyera incidentes de tránsito, conteos históricos de vehículos o tiempos de viaje.



- **Dependencia en la recolección primaria:** Se necesitó un fuerte apoyo de la recolección de datos manual y primaria (conteo en campo) para realizar la investigación.

Calibración y Validación de los Modelos de Simulación

- **Ajuste fino del comportamiento del flujo:** el proceso de ajustar los parámetros del modelo de simulación para que el tráfico vehicular en el entorno virtual concordara con la conducta real vista en las calles de Comayagua fue un procedimiento técnico y cíclico complicado.
- **Limitaciones de infraestructura para simulación:** las herramientas que se emplearon requirieron una capacidad de procesamiento significativa para gestionar la complejidad del grafo y llevar a cabo simulaciones de gran envergadura con lapsos de respuesta razonables.

Retos en la Integración y Transferencia Tecnológica

- **Curva de aprendizaje:** para el personal de gestión de tráfico tradicional, el uso de la Teoría de Grafos como herramienta de administración es conceptualmente nuevo y necesita un aprendizaje especializado para que se puedan entender e implementar adecuadamente los resultados.

13.4. Recomendaciones

A partir de los resultados que se han logrado con la simulación de escenarios, el diagnóstico de la red vial y el modelado de grafos, se exponen las siguientes sugerencias estratégicas para los organismos responsables de la planificación urbana y las autoridades municipales en Comayagua:

- **Instalación de infraestructura vial esencial:** al llevar a cabo la transformación de intersecciones complicadas en rotundas y el rediseño geométrico de segmentos congestionados para suprimir los cuellos de botella y asegurar un flujo constante, se da prioridad a la inversión física en los nodos centrales que han sido identificados.
- **Sincronización y actualización del sistema de semáforos:** mejorar el control del tráfico a través de la puesta en marcha de una .ºnda verde coordinada en las vías principales y la transformación hacia semáforos inteligentes que funcionan con sensores, lo que posibilita ajustar los tiempos de luz verde según la demanda vehicular en tiempo real.
- **Digitalización y seguimiento constante (Smart City):** Cambiar hacia un modelo de gestión inteligente a través de la implementación de sensores IoT para recopilar



datos en tiempo real, así como la institucionalización del modelo de grafos como instrumento oficial y duradero para evaluar las obras públicas.

- **Gestión de la demanda y normativas:** Se deben establecer políticas de organización vial, las cuales se fundamentan en los patrones de flujo detectados, por ejemplo, restringiendo la circulación de vehículos pesados en horarios pico y señalizando oficialmente rutas alternativas que sean estratégicas para una distribución más efectiva de la carga vehicular.
- **Líneas de investigación futuras:** Ampliar la cobertura del modelo vigente incorporando capas de análisis para el transporte público y la movilidad multimodal (incluidos ciclistas y peatones), con el propósito de diseñar una planificación urbana más equitativa y sostenible.

13.5. Trabajos Futuros

La presente investigación ha establecido un modelo base utilizando la teoría de grafos para el análisis estático del tráfico en Comayagua. Sin embargo, para escalar esta solución hacia una gestión inteligente y autónoma ("Smart City"), se proponen las siguientes líneas de desarrollo basadas en la integración tecnológica:

Incorporación de la visión artificial para automatizar los conteos: reemplazar el proceso de recolección manual de datos a través del uso de algoritmos de visión por computadora (como SSD o YOLO) en las cámaras urbanas. Esto posibilitará la clasificación de vehículos, el conteo volumétrico y la detección de trayectorias en un modo automático y constante, lo cual disminuirá los costos operativos de recolección de datos y suprimirá el error humano.

Creación de un sistema híbrido: Simulación + Visión artificial + Grafos: desarrollar una plataforma integral que integre las tres tecnologías fundamentales:

- Grafos: para la lógica estructural y el cálculo de las rutas más eficaces.
- Visión artificial: para la introducción de datos en tiempo real.
- Simulación: para la predicción de situaciones en el futuro. Este sistema híbrido operará como un "Gemelo Digital" de la ciudad, con la capacidad de auto ajustarse de manera continua.

Implementación de un Centro de Monitoreo Urbano Inteligente: crear un centro de control único que integre la información que proviene del sistema híbrido. Utilizando tableros de control interactivos que se nutren del análisis automático de las cámaras, este centro facilitará a las autoridades la visualización de alertas de congestión en el mapa de grafos y la toma de decisiones proactivas desde un sitio centralizado.

Evaluación y medición de impacto mediante visión artificial: usar la infraestructura de las cámaras no solo con el fin de monitorear, sino también como instrumento para auditar las estrategias que se han implementado. El sistema llevará a cabo una comparación visual de los flujos .^Antesz "Después" de la intervención, cuantificando la disminución real de las colas y validando de forma empírica la eficacia de las proposiciones del estudio.





Parte VII

REFERENCIAS

Bibliografía

- [1] «Higher education | UNESCO,» visitado 2026-02-06. dirección: <https://www.unesco.org/en/higher-education>
- [2] M. Becerra, J. D. Alonso y M. Frias, «COVID-19 Coronavirus Response Context: Latin America and the Caribbean: Tertiary Education,» World Bank, Washington, DC, Technical Response Note, 2021. visitado 2026-02-06. dirección: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/720271590700883381/pdf/COVID-19-Impact-on-Tertiary-Education-in-Latin-America-and-the-Caribbean.pdf>
- [3] *Informe diagnóstico sobre la educación superior y la ciencia post COVID-19 en Iberoamérica: perspectivas y desafíos de futuro* : 2022, col. de M. Marquina. Madrid y Caracas: Organización de Estados Iberoamericanos (OEI) ; CAF Banco de Desarrollo de América Latina, 2022, OCLC: 1430554030, ISBN: 978-84-86025-25-0. visitado 2026-02-13. dirección: <https://oei.int/publicaciones/informe-diagnostico-sobre-la-educacion-superior-y-la-ciencia-post-covid-19-en-iberoamerica-perspectivas-y-desafios-de-futuro>
- [4] G. Ríos, V. Galán-Muros y K. Bocanegra, «Educación Superior, Productividad y Competitividad en Iberoamérica,» Organización de Estados Iberoamericanos (OEI), Madrid, España, oct. de 2020. visitado 2026-02-06. dirección: <https://oei.int/wp-content/uploads/2020/10/educacion-sup-y-productividad-al-oei.pdf>
- [5] M. Moran. «Educación,» Desarrollo Sostenible, visitado 2026-02-06. dirección: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/>
- [6] L. Shao, M. Ieong, R. A. Levine, J. Stronach y J. Fan, «Machine learning methods for course enrollment prediction,» *Strategic Enrollment Management Quarterly*, vol. 9, 3 2021. dirección: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10389427>
- [7] S. Abdipoor, R. Yaakob, S. L. Goh y S. Abdullah, «Meta-heuristic approaches for the university course timetabling problem,» *Intelligent Systems with Applications*, vol. 19, pág. 200 253, sep. de 2023, issn: 26673053. doi: 10.1016/j.iswa.2023.200253

- visitado 2026-02-12. dirección: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2667305323000789>
- [8] M. R. Gallegos Macías, J. Galarza López y J. L. Almuñás Rivero, «Los sistemas de información estratégica en la gestión universitaria: problemáticas que enfrentan,» 9 de jun. de 2023, Version Number: 1.0. doi: [10.5281/ZENODO.8021659](https://doi.org/10.5281/ZENODO.8021659) visitado 2026-02-08. dirección: <https://zenodo.org/record/8021659>
- [9] E. S. Guadalupe Beltrán, J. Y. Palomeque Zambrano y B. A. Loor Avila, «Desafíos de la Educación Superior en Contextos Híbridos: Análisis de las Prácticas Docentes en la Universidad Estatal de Milagro durante el Periodo Académico 2025,» *Revista Veritas de Difusão Científica*, vol. 6, n.º 2, págs. 1259-1281, 15 de jul. de 2025, issn: 2965-6052, 2595-2021. doi: [10.61616/rvdc.v6i2.685](https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i2.685) visitado 2026-02-07. dirección: <https://revistaveritas.org/index.php/veritas/article/view/685>
- [10] T. Shenkoya y E. Kim, «Sustainability in higher education: Digital transformation of the fourth industrial revolution and its impact on open knowledge,» *Sustainability*, vol. 15, n.º 3, pág. 2473, 30 de ene. de 2023, issn: 2071-1050. doi: [10.3390/su15032473](https://doi.org/10.3390/su15032473) visitado 2026-02-07. dirección: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2473>
- [11] P. Stavrinides y K. M. Zuev, «Course-prerequisite networks for analyzing and understanding academic curricula,» *Applied Network Science*, vol. 8, n.º 1, pág. 19, 13 de abr. de 2023, issn: 2364-8228. doi: [10.1007/s41109-023-00543-w](https://doi.org/10.1007/s41109-023-00543-w) visitado 2026-02-07. dirección: <https://appliednetsci.springeropen.com/articles/10.1007/s41109-023-00543-w>
- [12] S. Shilbayeh y A. Abonamah, «Predicting student enrolments and attrition patterns in higher educational institutions using machine learning,» *The International Arab Journal of Information Technology*, vol. 18, n.º 4, 2021, issn: 2309-4524, 1683-3198. doi: [10.34028/18/4/8](https://doi.org/10.34028/18/4/8) visitado 2026-02-07. dirección: <https://iajit.org/PDF/July%202021,%20No.%204/19461.pdf>
- [13] S. Li, Y. Quan, L. Xiao, H. Ren y A. Y. Abinova, «Exploring the influence of social media communication and brand image on international student enrollment intentions in higher education,» *Frontiers in Education*, vol. 10, pág. 1618524, 20 de ago. de 2025, issn: 2504-284X. doi: [10.3389/feduc.2025.1618524](https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1618524) visitado 2026-02-11. dirección: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feduc.2025.1618524/full>
- [14] L. Guàrdia, D. Clougher, T. Anderson y M. Maina, «IDEAS for Transforming Higher Education: An Overview of Ongoing Trends and Challenges,» *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, vol. 22, n.º 2, págs. 166-184, 29 de ene. de 2021, issn: 1492-3831. doi: [10.19173/irrodl.v22i2.5206](https://doi.org/10.19173/irrodl.v22i2.5206) visitado 2026-02-07. dirección: [http://www.irrodl.org/index.php/irrodl/article/view/5206](https://www.irrodl.org/index.php/irrodl/article/view/5206)



- [15] H. Crompton y D. Burke, «Artificial intelligence in higher education: The state of the field,» *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, vol. 20, n.º 1, pág. 22, 24 de abr. de 2023, issn: 2365-9440. doi: [10.1186/s41239-023-00392-8](https://doi.org/10.1186/s41239-023-00392-8) visitado 2026-02-07. dirección: <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00392-8>
- [16] S. H. Al-Azzam y M. Al-Oudat, «Artificial Intelligence-Based Classification and Prediction of Academic and Psychological Challenges in Higher Education,» *Educational Process International Journal*, vol. 15, n.º 1, 2025, issn: 25648020. doi: [10.22521/edupij.2025.15.150](https://doi.org/10.22521/edupij.2025.15.150) visitado 2026-02-11. dirección: <https://www.edupij.com/index/arsiv/76/521/artificial-intelligence-based-classification-and-prediction-of-academic-and-psychological-challenges-in-higher-education>
- [17] J. R. Iparraguirre Contreras, I. A. Salazar Velásquez, N. F. Luis Gómez y P. J. Ríos Vera, «Educación superior, modalidad hibrida en tiempos de pospandemia: Una revisión sistemática,» *Revista Andina de Educación*, vol. 6, n.º 2, pág. 000627, 1 de jul. de 2023, issn: 2631-2816. doi: [10.32719/26312816.2022.6.2.7](https://doi.org/10.32719/26312816.2022.6.2.7) visitado 2026-02-14. dirección: <https://revistas.uasb.edu.ec/index.php/ree/article/view/3888>
- [18] K. M. Pillajo Pila, P. N. Cueva Cabrera, E. P. Guazhambo Castillo, J. Y. Barberan Castro y J. O. Briones Calvache, «El Impacto del Aprendizaje Híbrido en Estudiantes Universitarios en el Siglo XXI: Efectividad, Beneficios y Desafíos en América Latina: The Impact of Hybrid Learning on University Students in the 21st Century: Effectiveness, Benefits, and Challenges in Latin America,» *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, vol. 6, n.º 1, 30 de ene. de 2025, issn: 2789-3855. doi: [10.56712/latam.v6i1.3381](https://doi.org/10.56712/latam.v6i1.3381) visitado 2026-02-14. dirección: <https://latam.redilat.org/index.php/lt/article/view/3381>
- [19] G. Rodriguez Caballero, E. Salazar Arango y G. E. Naranjo Vaca, «Modelo híbrido de educación: retos para la formación y superación de docentes,» *Revista de investigación, formación y desarrollo: Generando productividad institucional*, vol. 12, n.º 1, págs. 26-34, 23 de mayo de 2024, issn: 1390-9681, 1390-9789. doi: [10.34070/rif.v12.i1.VUJQ7428](https://doi.org/10.34070/rif.v12.i1.VUJQ7428) visitado 2026-02-14. dirección: <https://ojs.formacion.edu.ec/index.php/rif/article/view/339>
- [20] N. Min-Allah y S. Alrashed, «Smart campus—a sketch,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 59, pág. 102231, ago. de 2020, issn: 22106707. doi: [10.1016/j.scs.2020.102231](https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102231) visitado 2026-02-14. dirección: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102231>

- [21] T. A. Kustitskaya, R. V. Esin, A. A. Kytmanov y T. V. Zykova, «Designing an education database in a higher education institution for the data-driven management of the educational process,» *Education Sciences*, vol. 13, n.º 9, pág. 947, 16 de sep. de 2023, issn: 2227-7102. doi: [10.3390/educsci13090947](https://doi.org/10.3390/educsci13090947) visitado 2026-02-07. dirección: <https://www.mdpi.com/2227-7102/13/9/947>
- [22] D. Alvarez-Sánchez, K. Velázquez-Victorica, A. Mungaray-Moctezuma y A. López-Guerrero, «Administrative processes efficiency measurement in higher education institutions: A scoping review,» *Education Sciences*, vol. 13, n.º 9, pág. 855, 23 de ago. de 2023, issn: 2227-7102. doi: [10.3390/educsci13090855](https://doi.org/10.3390/educsci13090855) visitado 2026-02-07. dirección: <https://www.mdpi.com/2227-7102/13/9/855>
- [23] M. C. Chen, S. N. Sze, S. L. Goh, N. R. Sabar y G. Kendall, «A Survey of University Course Timetabling Problem: Perspectives, Trends and Opportunities,» *IEEE Access*, vol. 9, págs. 106515-106529, 2021, issn: 2169-3536. doi: [10.1109/ACCESS.2021.3100613](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3100613) visitado 2026-02-07. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9499056/>
- [24] L. Yang, «Exploration of digital transformation path of education management in colleges and universities in the internet era,» *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, n.º 1, pág. 20240802, 1 de ene. de 2024, issn: 2444-8656. doi: [10.2478/amns-2024-0802](https://doi.org/10.2478/amns-2024-0802) visitado 2026-02-11. dirección: <http://archive.sciendo.com/AMNS/amns-2024-0802.open-issue/amns-2024-0802/amns-2024-0802.pdf>
- [25] L. A. Farinola y M. B. M. Assogba, «Explicit Artificial Intelligence Timetable Generator for Colleges and Universities,» *Open Journal of Applied Sciences*, vol. 15, n.º 8, págs. 2277-2290, 2025, issn: 2165-3917, 2165-3925. doi: [10.4236/ojapps.2025.158151](https://doi.org/10.4236/ojapps.2025.158151) visitado 2026-02-11. dirección: <https://www.scirp.org/journal/doi.aspx?doi=10.4236/ojapps.2025.158151>
- [26] H. Almaghrabi, B. Soh, A. Li e I. Alsolbi, «SoK: The impact of educational data mining on organisational administration,» *Information*, vol. 15, n.º 11, pág. 738, 19 de nov. de 2024, issn: 2078-2489. doi: [10.3390/info15110738](https://doi.org/10.3390/info15110738) visitado 2026-02-11. dirección: <https://www.mdpi.com/2078-2489/15/11/738>
- [27] D. Pérez-Jorge, M. C. González-Afonso, A. G. Santos-Álvarez, Z. Plasencia-Carballo y C. D. L. Á. Perdomo-López, «The impact of AI-driven application programming interfaces (APIs) on educational information management,» *Information*, vol. 16, n.º 7, pág. 540, 25 de jun. de 2025, issn: 2078-2489. doi: [10.3390/info16070540](https://doi.org/10.3390/info16070540) visitado 2026-02-11. dirección: <https://www.mdpi.com/2078-2489/16/7/540>
- [28] D. Amo, P. Gómez, L. Hernández-Ibáñez y D. Fonseca, «Educational warehouse: Modular, private and secure cloudable architecture system for educational data sto-

- rage, analysis and access,» *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 2, pág. 806, 16 de ene. de 2021, issn: 2076-3417. doi: [10.3390/app11020806](https://doi.org/10.3390/app11020806) visitado 2026-02-07. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/806>
- [29] A. Almalawi, B. Soh, A. Li y H. Samra, «Predictive models for educational purposes: A systematic review,» *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 8, n.º 12, pág. 187, 13 de dic. de 2024, issn: 2504-2289. doi: [10.3390/bdcc8120187](https://doi.org/10.3390/bdcc8120187) visitado 2026-02-11. dirección: <https://www.mdpi.com/2504-2289/8/12/187>
- [30] Prof. Ramkrishna More College, Pradhikaran, Pune, India., H. A. Bhosale y S. K. Hore, «AI-Based Academic Scheduling Engine for Intelligent Study Time Allocation,» *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, vol. 09, n.º 12, págs. 1-9, 12 de dic. de 2025, issn: 25823930. doi: [10.5504/IJSREM55144](https://doi.org/10.5504/IJSREM55144) visitado 2026-02-11. dirección: <https://ijsrem.com/download/ai-based-academic-scheduling-engine-for-intelligent-study-time-allocation/>
- [31] J. L. P. Riera, M. Y. L. Vazquez y D. R. Rangel, «Pronóstico de la demanda estudiantil mediante modelos de regresión: un estudio comparativo de la unidad académica de ingeniería, industria y construcción de la Universidad Católica de Cuenca,» *Maestro y Sociedad*, vol. 22, n.º 4, págs. 3790-3798, 25 de dic. de 2025, issn: 1815-4867. visitado 2026-02-07. dirección: <https://maestroysociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/7300>
- [32] M. Quimiz-Moreira, R. Delgadillo, J. Parraga-Alava, N. Maculan y D. Mauricio, «Factors, prediction, explainability, and simulating university dropout through machine learning: A systematic review, 2012–2024,» *Computation*, vol. 13, n.º 8, pág. 198, 12 de ago. de 2025, issn: 2079-3197. doi: [10.3390/computation13080198](https://doi.org/10.3390/computation13080198) visitado 2026-02-11. dirección: <https://www.mdpi.com/2079-3197/13/8/198>
- [33] S. C. Matz, C. S. Bukow, H. Peters, C. Deacons, A. Dinu y C. Stachl, «Using machine learning to predict student retention from socio-demographic characteristics and app-based engagement metrics,» *Scientific Reports*, vol. 13, n.º 1, pág. 5705, 7 de abr. de 2023, issn: 2045-2322. doi: [10.1038/s41598-023-32484-w](https://doi.org/10.1038/s41598-023-32484-w) visitado 2026-02-08. dirección: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32484-w>
- [34] J. R. Woottton, A. García-Ortiz y S. M. Amin, «Intelligent transportation systems: A global perspective,» *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 22, n.º 4, págs. 259-268, ago. de 1995, issn: 0895-7177. doi: [10.1016/0895-7177\(95\)00137-Q](https://doi.org/10.1016/0895-7177(95)00137-Q) visitado 2025-10-12. dirección: [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(95\)00137-Q](https://doi.org/10.1016/0895-7177(95)00137-Q)
- [35] M. Gillani, H. A. Niaz, M. U. Farooq y A. Ullah, «Data collection protocols for VANETs: a survey,» en, *Complex & Intelligent Systems*, vol. 8, n.º 3, págs. 2593-2622,

- jun. de 2022, ISSN: 2198-6053. doi: [10.1007/s40747-021-00629-x](https://doi.org/10.1007/s40747-021-00629-x) visitado 2025-10-12. dirección: <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00629-x>
- [36] S. Hussain, D. Wu, S. Memon y N. K. Bux, «Vehicular ad hoc network (VANET) connectivity analysis of a highway toll plaza,» en-GB, *Data*, vol. 4, n.º 1, undefined-undefined, 2019, ISSN: 23065729. doi: [10.3390 / data4010028](https://doi.org/10.3390/data4010028) visitado 2025-10-12. dirección: https://www.mendeley.com/catalogue/d4f44e93-5363-3dc4-9648-e7f0e6b5f1f2/?utm_source=chatgpt.com
- [37] O. S. Al-Heety, Z. Zakaria, M. Ismail, M. M. Shakir, S. Alani y H. Alsariera, «A Comprehensive Survey: Benefits, Services, Recent Works, Challenges, Security, and Use Cases for SDN-VANET,» *IEEE Access*, vol. 8, págs. 91 028-91 047, 2020, ISSN: 2169-3536. doi: [10.1109/ACCESS.2020.2992580](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992580) visitado 2025-10-12. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9088232>
- [38] L. Wang, Y.-X. Wang, J.-K. Li, Y. Liu y J.-T. Pi, «Adaptive Traffic Signal Control Method Based on Offline Reinforcement Learning,» en, *Applied Sciences*, vol. 14, n.º 22, pág. 10165, ene. de 2024, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2076-3417. doi: [10.3390/app142210165](https://doi.org/10.3390/app142210165) visitado 2025-10-12. dirección: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/22/10165>
- [39] X. Qin, «Research on Big Data-Driven Urban Traffic Flow Prediction Based on Deep Learning,» en, *International Journal of Information Technologies and Systems Approach (IJITSA)*, vol. 16, n.º 1, págs. 1-20, ene. de 2023, Publisher: IGI Global Scientific Publishing, ISSN: 1935-570X. doi: [10.4018/IJITSA.323455](https://doi.org/10.4018/IJITSA.323455) visitado 2025-10-12. dirección: https://www.igi-global.com/article/research-on-big-data-driven-urban-traffic-flow-prediction-based-on-deep-learning/www.igi-global.com/article/research-on-big-data-driven-urban-traffic-flow-prediction-based-on-deep-learning/323455?utm_source=chatgpt.com
- [40] M. A. Vieira, M. Vieira, P. Louro, P. Vieira y R. Fernandes, «Adaptive Traffic Control Using Cooperative Communication Through Visible Light,» en, *SN Computer Science*, vol. 5, n.º 1, pág. 159, ene. de 2024, ISSN: 2661-8907. doi: [10.1007/s42979-023-02483-9](https://doi.org/10.1007/s42979-023-02483-9) visitado 2025-10-12. dirección: <https://doi.org/10.1007/s42979-023-02483-9>
- [41] M. Miletic, E. Ivanjko, M. Gregurić y K. Kušić, «A review of reinforcement learning applications in adaptive traffic signal control,» *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 16, n.º 10, págs. 1269-1285, oct. de 2022, Publisher: The Institution of Engineering and Technology. doi: [10.1049/itr2.12208](https://doi.org/10.1049/itr2.12208) visitado 2025-10-12. dirección: <https://digital-library.theiet.org/doi/full/10.1049/itr2.12208>

- [42] S. Zhu, K. Guo, Y. Guo, H. Tao y Q. Shi, «An Adaptive Signal Control Method with Optimal Detector Locations,» en, *Sustainability*, vol. 11, n.º 3, pág. 727, ene. de 2019, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2071-1050. doi: [10.3390/su11030727](https://doi.org/10.3390/su11030727) visitado 2025-10-13. dirección: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/727>
- [43] K. Nellore y G. P. Hancke, «Traffic Management for Emergency Vehicle Priority Based on Visual Sensing,» en, *Sensors*, vol. 16, n.º 11, pág. 1892, nov. de 2016, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1424-8220. doi: [10.3390/s16111892](https://doi.org/10.3390/s16111892) visitado 2025-10-13. dirección: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/11/1892>
- [44] W. Genders y S. Razavi, *An Open-Source Framework for Adaptive Traffic Signal Control*, arXiv:1909.00395 [eess], sep. de 2019. doi: [10.48550/arXiv.1909.00395](https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.00395) visitado 2025-10-13. dirección: <http://arxiv.org/abs/1909.00395>
- [45] W. N. S. F. W. Ariffin et al., «Real-time Dynamic Traffic Light ControlSystem with Emergency Vehicle Priority,» en, *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1878, n.º 1, pág. 012 063, mayo de 2021, Publisher: IOP Publishing, ISSN: 1742-6596. doi: [10.1088/1742-6596/1878/1/012063](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012063) visitado 2025-10-13. dirección: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012063>
- [46] B. Bollobas, *Modern Graph Theory*, en. Springer Science & Business Media, dic. de 2013, Google-Books-ID: JelIBQAAQBAJ, ISBN: 978-1-4612-0619-4.
- [47] R. Diestel, «The Basics,» en, en *Graph Theory*, R. Diestel, ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 2025, págs. 1-35, ISBN: 978-3-662-70107-2. doi: [10.1007/978-3-662-70107-2_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-70107-2_1) visitado 2025-11-20. dirección: https://doi.org/10.1007/978-3-662-70107-2_1
- [48] G. Borg y C. Abela, *Graph Based Traffic Analysis and Delay Prediction*, arXiv:2410.21028 [cs], oct. de 2024. doi: [10.48550/arXiv.2410.21028](https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.21028) visitado 2025-11-20. dirección: <http://arxiv.org/abs/2410.21028>
- [49] R. Zhang, «Network Flow of Graph Theory and Its Application:» en, en *Proceedings of the 1st International Conference on Engineering Management, Information Technology and Intelligence*, Shanghai, China: SCITEPRESS - Science y Technology Publications, 2024, págs. 692-696, ISBN: 978-989-758-713-9. doi: [10.5220/0012968800004508](https://doi.org/10.5220/0012968800004508) visitado 2025-11-20. dirección: <https://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0012968800004508>

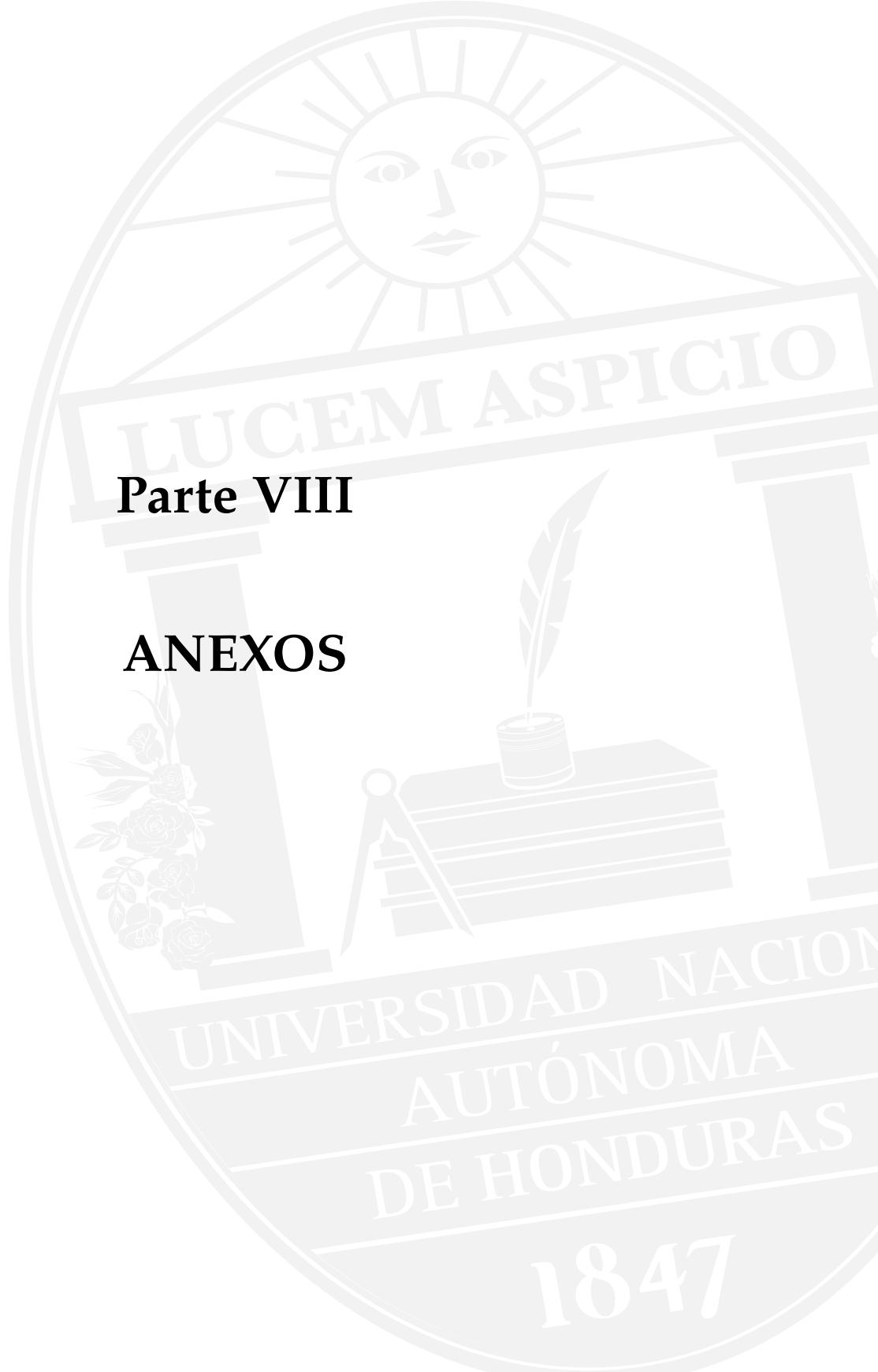
- [50] P. Musmade, «A Study of Graph Theory in Traffic Control System,» en, vol. 1, 2024. dirección: https://adypsoe.in/adypjiet/R1_ADYPJIET%20A%20Study%20of%20Graph%20Theory%20in%20Traffic%20Control%20System.pdf
- [51] V. Reddy, B. C. Sri y V. Ganesan, «Efficient Traffic Control Using Graph Theory: A Comprehensive Overview and Application,» en, ISSN: 2582-2160. dirección: <https://www.ijfmr.com/papers/2024/2/12831.pdf>
- [52] F. C. Arias, O. D. Cardozo y M. A. Parras, «Análisis de conectividad y densidad de la red vial en la Reserva Natural del Iberá con Sistemas de Información Geográfica (SIG),» es, *Geográfica digital*, vol. 13, n.º 26, págs. 1-16, sep. de 2016, ISSN: 1668-5180. doi: [10.30972/geo.13262099](https://doi.org/10.30972/geo.13262099) visitado 2025-11-20. dirección: <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/geo/article/view/2099>
- [53] S. Porta, P. Crucitti y V. Latora, *The Network Analysis of Urban Streets: A Dual Approach*, arXiv:cond-mat/0411241, nov. de 2004. doi: [10.48550/arXiv.cond-mat/0411241](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0411241) visitado 2025-11-20. dirección: [http://arxiv.org/abs/cond-mat/0411241](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0411241)
- [54] S. Guze, «Graph Theory Approach to the Vulnerability of Transportation Networks,» en, *Algorithms*, vol. 12, n.º 12, dic. de 2019, Company: Multidisciplinary Digital Publishing Institute Distributor: Multidisciplinary Digital Publishing Institute Institution: Multidisciplinary Digital Publishing Institute Label: Multidisciplinary Digital Publishing Institute Publisher: publisher, ISSN: 1999-4893. doi: [10.3390/a12120270](https://doi.org/10.3390/a12120270) visitado 2025-11-20. dirección: <https://www.mdpi.com/1999-4893/12/12/270>
- [55] M. Barthelemy, «Spatial Networks,» en, *Physics Reports*, vol. 499, n.º 1-3, págs. 1-101, feb. de 2011, arXiv:1010.0302 [cond-mat], ISSN: 03701573. doi: [10.1016/j.physrep.2010.11.002](https://arxiv.org/abs/1010.0302) visitado 2025-11-20. dirección: [http://arxiv.org/abs/1010.0302](https://arxiv.org/abs/1010.0302)
- [56] E. Coto, «Algoritmos Básicos de Grafos,» es, 2003, ISSN: 1316-6239. dirección: https://d1wqxts1xzle7.cloudfront.net/40820165/CotoND200302-libre.pdf?Expires=1763689885&Signature=ax7Dm6snNc~B9ZkfF1dRxfppsoBxF6B11oogDvw1Pg~Qge4-fe8EKVk-Fxbim-jqw3KcvLT1NnEQI~IHcqlswDD7NG05fUtB~nit8owW0iP518FUahWMb3S6IOxT0NvG87wFvW5hYmriVjc54WoHfJ57KS5N24cVDV5J4q21pcUYymiVbADSr1XicMi3ke-c8ZQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [57] A. Cardillo, S. Scellato, V. Latora y S. Porta, «Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns,» *Physical Review E*, vol. 73, n.º 6, pág. 066107, jun. de 2006, arXiv:physics/0510162, ISSN: 1539-3755, 1550-2376. doi: [10.1103/PhysRevE.73.066107](https://arxiv.org/abs/physics/0510162) visitado 2025-11-21. dirección: [http://arxiv.org/abs/physics/0510162](https://arxiv.org/abs/physics/0510162)

- [58] G. Rottoli, H. Merlino y R. Garcia-Martinez, «Proceso para el Descubrimiento de Asociaciones Espaciales Mediante Subgrafos Frecuentes,» oct. de 2018. dirección: https://www.researchgate.net/profile/Giovanni-Rottoli/publication/328388427_Proceso_para_el_Descubrimiento_de_Asociaciones_Espaciales_Mediante_Subgrafos_Frecuentes/links/5bc9d313299bf17a1c5ff32e/Proceso-para-el-Descubrimiento-de-Asociaciones-Espaciales-Mediante-Subgrafos-Frecuentes.pdf
- [59] H. Bast et al., *Route Planning in Transportation Networks*, arXiv:1504.05140 [cs], abr. de 2015. doi: 10.48550/arXiv.1504.05140 visitado 2025-11-21. dirección: <http://arxiv.org/abs/1504.05140>
- [60] V. Tiara, «Optimizing Urban Transportation Networks: Comparative Analysis of Dijkstra's Algorithm in Graph-Based Shortest Path Solutions,» en, dirección: [https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2024-2025/Makalah/Makalah-IF1220-Matdis-2024%20\(119\).pdf](https://informatika.stei.itb.ac.id/~rinaldi.munir/Matdis/2024-2025/Makalah/Makalah-IF1220-Matdis-2024%20(119).pdf)
- [61] M. Ayari, A. Gharbi, Z. Klai, A. Hasnaoui, M. S. Elsayed y E. Abdelrahim, «Optimizing Communication Network Routing with A* Algorithm: A Comparative Study Against Bellman-Ford and Dijkstra for Enhanced Quality of Service,» en, *European Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 18, n.º 4, págs. 7091-7091, nov. de 2025, issn: 1307-5543. doi: 10.29020/nybg.ejpam.v18i4.7091 visitado 2025-11-22. dirección: <https://www.ejpam.com/index.php/ejpam/article/view/7091>
- [62] P. Crucitti, V. Latora y S. Porta, «Centrality Measures in Spatial Networks of Urban Streets,» *Physical Review E*, vol. 73, n.º 3, pág. 036 125, mar. de 2006, arXiv:physics/0504163, issn: 1539-3755, 1550-2376. doi: 10.1103/PhysRevE.73.036125 visitado 2025-11-22. dirección: <http://arxiv.org/abs/physics/0504163>
- [63] M. Kurant y P. Thiran, «Trainspotting: Extraction and Analysis of Traffic and Topologies of Transportation Networks,» *Physical Review E*, vol. 74, n.º 3, pág. 036 114, sep. de 2006, arXiv:physics/0510151, issn: 1539-3755, 1550-2376. doi: 10.1103/PhysRevE.74.036114 visitado 2025-11-22. dirección: <http://arxiv.org/abs/physics/0510151>
- [64] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch y L. Bieker, «Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility,» en, 2012. dirección: https://personales.upv.es/thinkmind/dl/journals/sysmea/sysmea_v5_n34_2012/sysmea_v5_n34_2012_4.pdf
- [65] K. Nagel y M. Schreckenberg, «A cellular automaton model for freeway traffic,» en, *Journal de Physique I*, vol. 2, n.º 12, págs. 2221-2229, dic. de 1992, issn: 1155-4304,

- 1286-4862. doi: [10.1051/jp1:1992277](https://doi.org/10.1051/jp1:1992277) visitado 2025-11-23. dirección: <http://www.edpsciences.org/10.1051/jp1:1992277>
- [66] O. A. Benavidez, *Medidas de alivio vial permitirán una solución al tráfico vehicular, confirma Jorge Aldana*, es, oct. de 2023. visitado 2025-10-18. dirección: <https://tnh.gob.hn/nacional/medidas-de-alivio-vial-permitiran-una-solucion-al-trafico-vehicular-confirma-jorge-aldana/>
- [67] PARQUE VEHICULAR 2017 - 2021, es. dirección: <https://ine.gob.hn/2022/12/09/boletin-parque-vehicular-2017-2021/>
- [68] M. López, *El tráfico no cede en Tegucigalpa pese al plan de alivio con teletrabajo para burócratas*, es-HN, Section: Tegucigalpa. visitado 2025-10-18. dirección: <https://www.elheraldo.hn/tegucigalpa/trafico-cede-tegucigalpa-pese-plan-alivio-vial-alcaldia-tegucigalpa-HL27791699>
- [69] Google Maps, es-419. visitado 2025-10-18. dirección: https://www.google.com/maps/@14.4638701,-87.6460789,19.25z/data=!5m1!1e1?entry=ttu&g_ep=EgoYMDI1MTAxNC4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D
- [70] Plan de Movilidad Urbana Sostenible. dirección: https://static1.squarespace.com/static/5a657d43bff200b621e34a72/t/5ffdace2817be85b88e2bfb2/1610460509847/PMUS_WEB.pdf#page=5.07
- [71] A. Lie y C. Tingvall, «ISO 39001 Road Traffic Safety Management System, Performance Recording, and Reporting,» en, en *The Vision Zero Handbook*, Springer, Cham, 2022, págs. 1-13, isbn: 978-3-030-23176-7. doi: [10.1007/978-3-030-23176-7_26-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23176-7_26-1) visitado 2025-10-28. dirección: https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-3-030-23176-7_26-1
- [72] «(PDF) Overview of Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) Protocols and Standards,» en, *ResearchGate*, ago. de 2025. doi: [10.17485/ijst/2013/v6i7.18](https://doi.org/10.17485/ijst/2013/v6i7.18) visitado 2025-10-28. dirección: https://www.researchgate.net/publication/274639699_Overview_of_Wireless_Access_in_Vehicular_Environment_WAVE_Proocols_and_Standards
- [73] I. IEEE VT, «Literature Review on Kinematic Properties of Road Users for Use on Safety-Related Models for Automated Driving Systems,» *Literature Review on Kinematic Properties of Road Users for Use on Safety-Related Models for Automated Driving Systems*, págs. 1-35, abr. de 2022. visitado 2025-10-28. dirección: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9763462>
- [74] I. Granada, M. R. Porcel y A. B. Corte, «Sistemas inteligentes de transporte para la movilidad universal,» Spanish, *IDB Publications*, nov. de 2018, Publisher: Inter-

- American Development Bank. doi: 10 . 18235 / 0001390 visitado 2025-10-28. dirección: <https://publications.iadb.org/es/sistemas-inteligentes-de-transporte-para-la-movilidad-universal>
- [75] *Superar las trampas del desarrollo de América Latina y el Caribe en la era digital: el potencial transformador de las tecnologías digitales y la inteligencia artificial* | CEPAL, es. visitado 2025-10-28. dirección: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/80841-superar-trampas-desarrollo-america-latina-caribe-la-era-digital-potencial>
- [76] *LEY MARCO DEL SECTOR DE TELECOMUNICACIONES*, es-HN. visitado 2025-10-28. dirección: <https://www.tsc.gob.hn/biblioteca/index.php/leyes/122-ley-marco-del-sector-de-telecomunicaciones>
- [77] *Honduras | Agenda 2030 en América Latina y el Caribe*. visitado 2025-10-28. dirección: <https://agenda2030lac.org/es/paises/honduras>
- [78] N. A. Smuha, *The EU Approach to Ethics Guidelines for Trustworthy Artificial Intelligence*, en, SSRN Scholarly Paper, Rochester, NY, 2019. visitado 2025-10-28. dirección: <https://papers.ssrn.com/abstract=3443537>





Parte VIII

ANEXOS

14

Anexos

Anexo A Proceso de configuración de SUMO

En este anexo se presentan unas fotografías del proceso de configuración de SUMO. En la imagen se observa como se esta trabajando con la herramienta de edición de redes de SUMO (NETEDIT) para la creación de la red vial correspondiente al área de estudio.



Figura 14.1: Interfaz de SUMO NETEDIT para la edición de redes viales

Anexo B Equipo de cómputo utilizado

En este anexo se muestra el equipo de cómputo utilizado para la realización de las simulaciones vehiculares y análisis de datos presentados en este trabajo.

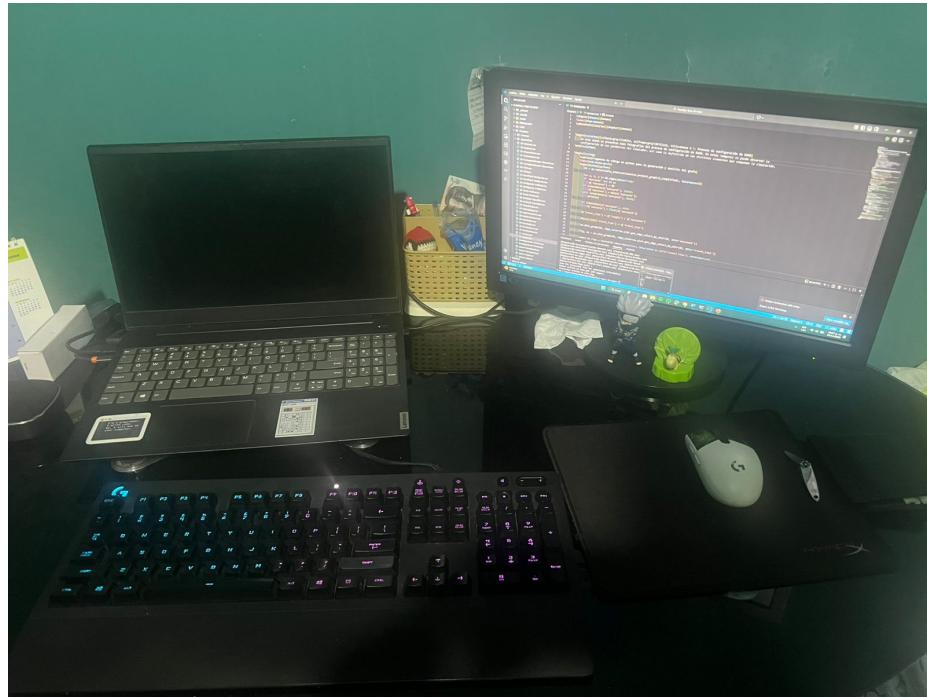


Figura 14.2: Equipo de cómputo utilizado para la realización de las simulaciones y análisis de datos

Anexo C Código en python para la generación del grafos

En este anexo se presenta un fragmento de código utilizado para la generación y análisis del grafo vial del área de estudio utilizando la librería OSMNX y NetworkX.

Código 8: Fragmento de código en python para la generación y análisis del grafo

```
1 G2 = ox.consolidate_intersections(ox.project_graph(G_simplified), tolerance=15)
2
3     for u, v, a in G2.edges(data=True):
4         if 'maxspeed' not in a:
5             a['maxspeed'] = 50
6         if isinstance(a['maxspeed'], list):
7             a['maxspeed'] = min(a['maxspeed'])
8         elif isinstance(a['maxspeed'], dict):
9             print(a)
10
11     if isinstance(a['maxspeed'], str):
12         a['maxspeed'] = float(a['maxspeed'])
13
14     a['travel_time'] = a['length'] / a['maxspeed']
15
16     G2[u][v][0]['travel_time'] = a['travel_time']
17
18     ox.plot_graph(G2, edge_color=ox.plot.get_edge_colors_by_attr(G2, attr='maxspeed'))
19
20     fig, ax = ox.plot_graph(G2, edge_color=ox.plot.get_edge_colors_by_attr(G2,
21     ↪ attr='travel_time'))
22
23     edges_by_time = sorted(G2.edges(data=True), key=lambda e: e[2]['travel_time'],
24     ↪ reverse=True)
25
26     [e[2].get('name', 'Unnamed edge') for e in edges_by_time[:10]]
27
28     nodes_centrality = nx.betweenness_centrality(G2, weight='length')
29
30     for node, centrality in nodes_centrality.items():
31         G2.nodes[node]['centrality'] = centrality
32
33     ox.plot_graph(G2, node_color=ox.plot.get_node_colors_by_attr(G2, attr='centrality'))
```

Anexo D Fragmento de código en python para la generación del gráficas

En este anexo se presentan el ejemplo de un código utilizado para el análisis de datos generados por la simulación vehicular en SUMO y la generación de las gráficas presentadas en el capítulo. El código completo se encuentra disponible en el cuaderno ejecutable: .

Código 9: Fragmento de código para el análisis de datos de SUMO y generación de gráficas

```
1 # Cargar y obtener los promedios de cada archivo para todas las columnas
2 datos_por_columna = {col: [] for col in cols}
3
4 for archivo, etiqueta_archivo in archivos:
5     df = pd.read_csv(archivo)
6     for col in cols:
7         promedio = df[col].mean()
8         datos_por_columna[col].append((promedio, etiqueta_archivo))
```