



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Diseño y Desarrollo de un Sistema de Semaforización mediante Inteligencia Artificial  
Visual para la Optimización del Flujo Vehicular**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autores:**

**HENRY NELSON BENAVIDES MORA  
DAVID STEVEN GÓMEZ ESCANDÓN**

**Director:**

**MGTR. DANIEL SANTIAGO CAPELO RAMÓN**

**CUENCA, ECUADOR**

**2026**

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo de titulación, en primer lugar, a mi madre, con profundo amor y gratitud, por su invaluable apoyo, su orientación constante y por ser el más grande ejemplo de esfuerzo y perseverancia. Su presencia, confianza y sacrificio han sido fundamentales para alcanzar esta meta académica.

De igual manera, dedico este trabajo a mis hermanos, por su permanente acompañamiento, comprensión y apoyo a lo largo de este proceso. Su cariño, motivación y respaldo incondicional han sido esenciales para culminar con éxito esta importante etapa de mi formación.

Benavides Mora Henry Nelson

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la persona que fui durante esta senda, por los esfuerzos sostenidos a lo largo de este proceso. A la persona que fui al iniciar este camino, con dudas, dificultades y momentos de incertidumbre; y a la persona que soy hoy, que logró avanzar a pesar de los obstáculos. Esta dedicatoria representa el reconocimiento a cada sacrificio silencioso, a cada decisión de continuar y a cada momento en el que, aun cuando parecía más fácil rendirse, elegí seguir adelante. Dedico este logro a mi perseverancia, a mi crecimiento personal y a la convicción de que las metas importantes requieren fortaleza y fe en uno mismo.

Gómez Escandón David Steven

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi agradecimiento a Dios, por haberme brindado la fortaleza, la paciencia y la sabiduría necesarias para superar cada uno de los retos durante este proceso académico, permitiéndome culminar esta importante etapa de mi vida.

De manera especial, manifiesto mi más profundo agradecimiento al Mgtr. Daniel Santiago Capelo Ramon, por su invaluable apoyo y orientación durante el desarrollo de esta tesis. Su dedicación, sus observaciones precisas y sus acertados consejos fueron fundamentales para el fortalecimiento y la mejora continua de este trabajo. Gracias a su experiencia y compromiso, fue posible alcanzar los objetivos propuestos.

De igual forma, agradezco sinceramente a mi familia y amigos, quienes estuvieron presentes en todo momento, brindándome su comprensión, motivación y ánimo constante. Su apoyo incondicional constituyó un pilar fundamental que me permitió avanzar con confianza y determinación a lo largo de este camino.

Benavides Mora Henry Nelson

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme sostenido con fortaleza, claridad y perseverancia a lo largo de este camino académico. Su presencia fue una guía en los momentos de incertidumbre y una fuente de ánimo para continuar hasta alcanzar esta meta.

A mis padres y a mi hermano, por estar presentes en los momentos más necesarios de mi formación.

A mis docentes, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi crecimiento académico y profesional durante toda mi carrera universitaria.

De manera especial, agradezco a mi tutor de tesis, por su orientación, paciencia y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de graduación. Sus observaciones y recomendaciones contribuyeron significativamente a fortalecer este proyecto, permitiéndonos mejorar tanto en el aspecto académico como en el proceso de investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas, incluso a aquellas que ya no están presentes, que de una u otra manera aportaron con su ayuda y colaboración para que este proyecto pudiera realizarse con éxito.

Gómez Escandón David Steven

# **DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL VISUAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FLUJO VEHICULAR**

Este artículo presenta el diseño y desarrollo de un sistema de semaforización inteligente basado en visión por computadora e inteligencia artificial. El sistema utiliza cámaras para capturar imágenes en tiempo real de los vehículos en cada intersección, permitiendo obtener información actualizada del flujo vehicular. Un modelo de inteligencia artificial procesa dichas imágenes para detectar y contabilizar el número de vehículos por carril, lo que permite determinar de manera dinámica la prioridad del tráfico. A partir de esta información, se implementa un algoritmo de control adaptativo que ajusta los tiempos de luz verde en función de la demanda vehicular en cada vía. Para la validación del sistema, se desarrolló un entorno de simulación que permite analizar distintos escenarios de tráfico, evaluando el comportamiento del sistema ante condiciones de flujo bajo, medio y alto. Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa en los tiempos de espera, una mejora en la fluidez vehicular y una disminución del tiempo de luz verde desaprovechado en comparación con los sistemas tradicionales de ciclo fijo. Este enfoque adaptativo permite optimizar el uso de la infraestructura vial existente, ofreciendo una solución eficiente, escalable y aplicable a entornos urbanos reales.

**Palabras clave:** Semaforización, Inteligencia artificial, Visión por computadora.

# DESIGN AND DEVELOPMENT OF A TRAFFIC LIGHT SYSTEM USING VISUAL ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR THE OPTIMIZATION OF VEHICULAR FLOW

This article presents the design and development of an intelligent traffic signal system based on computer vision and artificial intelligence. The system uses cameras to capture real-time images of vehicles at each intersection, providing up-to-date information on traffic flow. An artificial intelligence model processes these images to detect and count the number of vehicles per lane, enabling dynamic determination of traffic priority. Based on this information, an adaptive control algorithm is implemented that adjusts green light durations according to traffic demand on each lane. To validate the system, a simulation environment was developed to analyze different traffic scenarios, evaluating the system's performance under low, medium, and high traffic flow conditions. The results obtained show a significant reduction in wait times, improved traffic flow, and a decrease in wasted green light time compared to traditional fixed-cycle systems. This adaptive approach optimizes the use of existing road infrastructure, offering an efficient, scalable solution applicable to real-world urban environments.

**Keywords:** Semaphorization, Artificial intelligence, Computer Vision.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>Dedicatoria</b>	i
<b>Dedicatoria</b>	ii
<b>Agradecimientos</b>	iii
<b>Agradecimientos</b>	iv
<b>Resumen</b>	v
<b>Abstract</b>	vi
<b>Índice de Contenidos</b>	viii
<b>Índice de Figuras</b>	ix
<b>Índice de Tablas</b>	x
<b>I Introducción</b>	1
<b>II Metodología</b>	2
II-A Arquitectura general del sistema . . . . .	3
II-B Sistema de detección vehicular . . . . .	3
II-C Comunicación entre módulos . . . . .	4
II-D Diseño del algoritmo de control adaptativo . . . . .	4
II-E Casos de decisión del algoritmo adaptativo . . . . .	5
II-E1 Ausencia total de vehículos . . . . .	5
II-E2 Vehículos únicamente en una vía . . . . .	5
II-E3 Flujo bajo contra flujo alto . . . . .	5
II-E4 Flujo alto simultáneo . . . . .	6
II-E5 Prioridad por diferencia alta de tráfico . . . . .	6
II-E6 Prioridad por diferencia moderada . . . . .	6
II-F Entorno de simulación . . . . .	6
<b>III Pruebas y Resultados</b>	6
III-A Protocolo de pruebas del sistema . . . . .	6
III-B Prueba lógica del sistema . . . . .	7
III-B1 Fases evaluadas . . . . .	7
III-B2 Transiciones de estados . . . . .	7
III-B3 Validación de seguridad . . . . .	7
III-C Prueba de temporización semafórica . . . . .	7
III-D Prueba del sistema de detección vehicular . . . . .	8
III-D1 Protocolo experimental . . . . .	8
III-D2 Prueba del sistema de detección vehicular . . . . .	8
III-E Evaluación del sistema según nivel de flujo vehicular . . . . .	10
III-E1 Resultados generales de detección . . . . .	10
III-E2 Error de detección por vía . . . . .	10
III-F Prueba de seguridad ante fallas . . . . .	11
III-F1 Arquitectura del sistema y nivel de actuación . . . . .	11
III-F2 Modo de operación ante pérdida de comunicación . . . . .	11
III-F3 Nivel de seguridad y comportamiento del sistema . . . . .	11
III-F4 Acciones de protección . . . . .	11
III-F5 Justificación del diseño . . . . .	11
III-F6 Aplicación en el sistema implementado . . . . .	11
III-G Prueba de desempeño operativo . . . . .	12
III-G1 Comparación con sistema de tiempos fijos . . . . .	12

III-G2	Análisis basado en resultados experimentales . . . . .	12
III-G3	Análisis del tiempo verde desaprovechado . . . . .	12
III-G4	Mejora del sistema . . . . .	13
III-G5	Impacto del sistema en la gestión del tráfico . . . . .	13
<b>IV</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>13</b>
IV-A	Discusión de resultados . . . . .	14
IV-A1	Limitaciones del sistema . . . . .	14
IV-A2	Propuesta de mejora y escalabilidad del sistema . . . . .	14
<b>REFERENCIAS</b>		<b>14</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

1	Etapas del proceso de semaforización inteligente. . . . .	2
2	Intersección inteligente con cámaras y servidor local para detección vehicular en tiempo real. . . . .	2
3	Coordinación entre múltiples intersecciones controladas por un servidor central. . . . .	3
4	Arquitectura general del sistema inteligente de control semafórico. . . . .	3
5	Tipos de vehículos considerados en el sistema de detección vehicular mediante YOLOv8. . . . .	4
6	Proceso de detección y conteo vehicular mediante YOLOv8. . . . .	4
7	Esquema de comunicación entre los módulos. . . . .	5
8	Entorno de simulación desarrollado en Unity. . . . .	6
9	Escenario real de la intersección ubicada en las calles Tarqui y Presidente Córdova. . . . .	9
10	Detección de vehículos mediante YOLO en el sector del Arco de Yanuncay la avenida Loja de la ciudad de Cuenca, Ecuador. . . . .	9
11	Entorno de simulación del sistema semafórico desarrollado en Unity. . . . .	10
12	Comportamiento de los vehículos en función del estado del semáforo. . . . .	10

## ÍNDICE DE TABLAS

I	Transiciones del sistema . . . . .	7
II	Escenarios de prueba del sistema . . . . .	8
III	Evaluación del sistema de detección vehicular . . . . .	9
IV	Comparación global entre conteo manual y YOLO . . . . .	10
V	Error porcentual de detección por vía . . . . .	10
VI	Comparación conceptual entre sistema de tiempos fijos y sistema adaptativo . . . . .	12
VII	Error de detección por video . . . . .	12
VIII	Mejora porcentual promedio del sistema adaptativo frente al sistema tradicional . . . . .	13

# Diseño y Desarrollo de un Sistema de Semaforización mediante Inteligencia Artificial Visual para la Optimización del Flujo Vehicular

Henry Nelson Benavides Mora  
*Escuela de Ingeniería Electrónica*  
*Universidad del Azuay (UDA)*  
Cuenca, Ecuador  
nelsonbenavides23@es.uazuay.edu.ec

David Steven Gómez Escandón  
*Escuela de Ingeniería Electrónica*  
*Universidad del Azuay (UDA)*  
Cuenca, Ecuador  
stev.gomz@es.uazuay.edu.ec

**Abstract**—Traffic congestion is one of the most serious challenges facing urban mobility, as it affects efficiency, the environment, and quality of life. This research presents the design and implementation of a traffic signal control system based on computer vision and artificial intelligence. The proposed system integrates a detection module that uses the YOLOv8 model with a control algorithm implemented as a finite-state machine. The system dynamically adjusts traffic light phases based on traffic conditions. A Unity-based virtual environment was used to evaluate performance. The results show an improvement in traffic flow efficiency compared to traditional systems. Furthermore, the system reduces wasted green light time by approximately 16% to 5%. The vehicle detection module achieved an average error rate of less than 8%, confirming its suitability for real-time traffic monitoring applications. However, difficulties were observed in detecting motorcycles, primarily due to visual obstructions in situations involving violations of traffic regulations. Furthermore, limitations were identified in lack of illumination conditions that affected the system's accuracy.

**Keywords**—Semaphorization, Artificial intelligence, Computer vision.

## I. INTRODUCCIÓN

La congestión vehicular constituye uno de los problemas más críticos de la movilidad urbana, afectando tanto a países desarrollados como a aquellos en vías de desarrollo. De acuerdo con [1], los conductores en ciudades altamente congestionadas pierden en promedio 156 horas al año en embotellamientos, lo que se traduce en pérdidas económicas superiores a 200.000 millones de dólares a nivel mundial. En América Latina, el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF) estima que la congestión vehicular genera pérdidas anuales de entre el 2% y el 4% del Producto Interno Bruto (PIB), principalmente debido al tiempo perdido, el consumo excesivo de combustible y la disminución de la eficiencia logística [2].

En ciudades del Ecuador como Quito, Cuenca y Guayaquil, los tiempos de traslado durante horas de alta congestión superan los 90 minutos diarios, lo que impacta de manera directa en la calidad de vida de la población. El crecimiento sostenido del parque automotor, sin una expansión proporcional de la infraestructura vial, ha agravado esta problemática. Como

consecuencia, los conductores enfrentan demoras constantes, incremento en los costos de movilidad, mayor exposición a la contaminación ambiental y niveles elevados de estrés urbano [3].

Desde el punto de vista ambiental, el impacto también es significativo. La Agencia Internacional de Energía (IEA) reporta que los vehículos detenidos en congestión representan hasta el 30% del consumo innecesario de combustible en zonas urbanas, lo que incrementa las emisiones contaminantes [4]. En Quito, el Ministerio del Ambiente y Agua y Transición Ecológica (MAATE) ha identificado al parque automotor como responsable de más del 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, consolidándose como la principal fuente de contaminación del aire en la ciudad [5]. Esta situación no solo contribuye al cambio climático, sino que también afecta la salud pública mediante el incremento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

Adicionalmente, la congestión vehicular limita la movilidad eficiente de trabajadores, estudiantes y vehículos de emergencia. La Organización Mundial de la Salud (OMS) advierte que cada minuto de retraso en la atención de emergencias puede reducir significativamente la probabilidad de supervivencia en casos críticos. En Ecuador, se han documentado situaciones en las que ambulancias y unidades de bomberos quedan atrapadas en intersecciones congestionadas sin prioridad de paso, evidenciando las limitaciones de los sistemas de semaforización tradicionales [6].

Desde el punto de vista tecnológico, los semáforos convencionales operan bajo ciclos fijos preprogramados que no se ajustan a las variaciones del flujo vehicular en tiempo real. Este enfoque resulta ineficiente, ya que puede mantener en verde vías con bajo tránsito mientras genera tiempos de espera innecesarios en carriles congestionados. Aunque algunas ciudades han incorporado sensores magnéticos o radares, estas soluciones implican altos costos de instalación y mantenimiento, además de requerir infraestructura especializada, lo que dificulta su implementación en contextos con recursos limitados.

La congestión vehicular no solo representa un problema de tránsito, sino que involucra dimensiones económicas, so-

ciales, ambientales y tecnológicas. La pérdida de tiempo, el incremento de costos, el deterioro de la calidad del aire, la limitada capacidad de respuesta ante emergencias y el estrés urbano evidencian la necesidad de soluciones más eficientes y adaptativas.

En [7] se presenta un sistema de control adaptativo de semáforos en tiempo real, desplegable en dispositivos de borde, diseñado para entornos urbanos complejos. Dicha propuesta integra visión por computadora e Internet de las Cosas (IoT), utilizando un modelo ligero basado en *You Only Look Once* (YOLO) para la detección vehicular. Los resultados evidencian reducciones significativas en la congestión y en los tiempos de espera, lo que demuestra su viabilidad en entornos reales.

Por su parte, [8] propone un sistema de semáforos inteligentes basado en lógica difusa y técnicas de visión por computadora, utilizando herramientas como OpenCV para el procesamiento de imágenes y un microcontrolador para la implementación física del sistema. Esta solución busca optimizar la asignación de tiempos semafóricos en función de la densidad vehicular.

En [9] se describe un sistema que combina captura de video en tiempo real con procesamiento digital de señales y algoritmos de inteligencia artificial, permitiendo aplicaciones como la detección de infracciones, monitoreo de tráfico y reconocimiento de matrículas vehiculares.

Asimismo, en [10] se emplea el modelo YOLO para la detección en tiempo real de vehículos, peatones y bicicletas, utilizando una Raspberry Pi como plataforma de procesamiento. El sistema permite gestionar de manera adaptativa los semáforos y optimizar el flujo vehicular.

De manera similar, en [11] se plantea un sistema de gestión del tráfico basado en redes neuronales y análisis en tiempo real, ajustando dinámicamente las fases semafóricas en función de la densidad vehicular y el tiempo de espera.

En [12] se propone un sistema que utiliza técnicas de aprendizaje autónomo para clasificar distintos tipos de vehículos y ajustar los tiempos de señalización, incluyendo funcionalidades como la priorización de vehículos de emergencia.

Por otro lado, [13] presenta un Sistema Inteligente de Gestión del Tráfico (ITMS) que integra diversas tecnologías de inteligencia artificial para la detección de infracciones, reconocimiento de matrículas y monitoreo del comportamiento de los conductores.

Finalmente, en [14] se desarrolla un sistema que combina visión por computadora y análisis acústico para detectar tanto la densidad vehicular como la presencia de vehículos de emergencia, mejorando la precisión del sistema mediante un enfoque multimodal.

A pesar de los avances presentados en la literatura, muchas de estas soluciones requieren infraestructuras complejas, altos costos de implementación o no están adaptadas a las condiciones específicas de ciudades en desarrollo.

En este contexto, la presente investigación propone el diseño y desarrollo de un sistema de semaforización inteligente

basado en visión por computadora e inteligencia artificial, capaz de adaptarse dinámicamente a las condiciones reales del tráfico. La propuesta se fundamenta en el uso de cámaras para la captura de imágenes en tiempo real, el procesamiento mediante modelos de detección vehicular basados en redes neuronales convolucionales y la aplicación de algoritmos de control adaptativo para la gestión eficiente de los tiempos semafóricos.

## II. METODOLOGÍA

El funcionamiento general del sistema propuesto se describe en la Fig. 1, donde se presentan las etapas de captura, procesamiento, toma de decisiones y ejecución del control semafórico.



Fig. 1. Etapas del proceso de semaforización inteligente.

En la Fig. 2 se ilustra la arquitectura de una intersección inteligente con cámaras y un servidor local para el análisis en tiempo real.

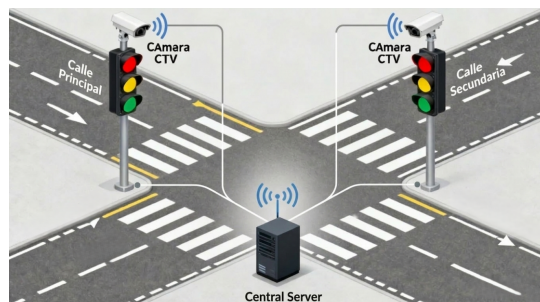


Fig. 2. Intersección inteligente con cámaras y servidor local para detección vehicular en tiempo real.

Finalmente, la Fig. 3 muestra la posibilidad de escalabilidad del sistema mediante la interconexión de múltiples intersecciones coordinadas por un servidor central.

En consecuencia, esta investigación busca contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas eficientes que permitan optimizar el flujo vehicular, reducir los tiempos de espera y mejorar la calidad de vida y la eficiencia del sistema de movilidad en entornos urbanos.

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque experimental y aplicado, orientado al diseño e implementación de un sistema inteligente de control semafórico basado en visión por computadora e integrado en un entorno de simulación. El objetivo metodológico consiste en diseñar una arquitectura capaz de detectar vehículos en tiempo real, procesar

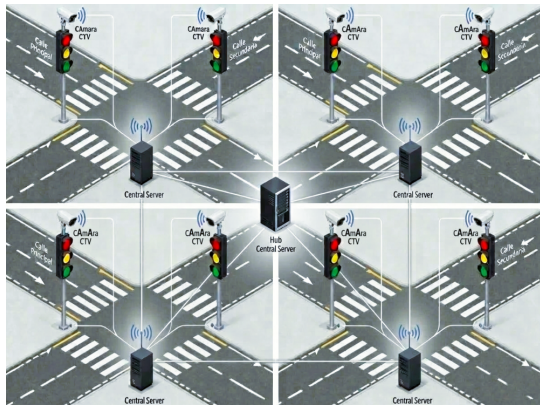


Fig. 3. Coordinación entre múltiples intersecciones controladas por un servidor central.

la información obtenida y ajustar dinámicamente los estados semafóricos en función del flujo vehicular.

Desde una perspectiva metodológica, el sistema propuesto combina técnicas de inteligencia artificial, procesamiento digital de imágenes y simulación interactiva. Esto permite evaluar el sistema en condiciones controladas de laboratorio, donde es posible analizar diferentes escenarios de tráfico y estudiar el comportamiento del algoritmo de control. A diferencia de los sistemas tradicionales de semáforos de ciclo fijo, el enfoque desarrollado en este trabajo responde dinámicamente a las condiciones reales de circulación, optimizando los tiempos de luz verde en cada vía según la cantidad de vehículos detectados.

El sistema desarrollado integra dos módulos principales:

- Módulo de visión artificial implementado en Python.
- Módulo de control y simulación implementado en Unity mediante lenguaje C#.

La separación en módulos permite definir una arquitectura distribuida, en la cual cada componente cumple una función específica dentro del sistema. El módulo de visión artificial se encarga de analizar las imágenes provenientes de cámaras o fuentes de video, extrayendo información relevante sobre la presencia y cantidad de vehículos. Por su parte, el sistema de simulación gestiona la representación visual del entorno, el control semafórico y la interacción entre los vehículos simulados y la infraestructura vial.

#### A. Arquitectura general del sistema

La arquitectura general del sistema se presenta en la Fig. 4. En ella se observa la interacción entre el módulo de detección vehicular y el módulo de control semafórico.

El sistema se basa en un flujo continuo de información que inicia con la adquisición de imágenes y finaliza con la actualización del estado de los semáforos en el entorno de simulación. Cada etapa cumple una función específica dentro del procesamiento de datos, permitiendo que la información capturada sea transformada en decisiones de control del tráfico.

- Captura de video.
- Procesamiento mediante el modelo YOLOv8.

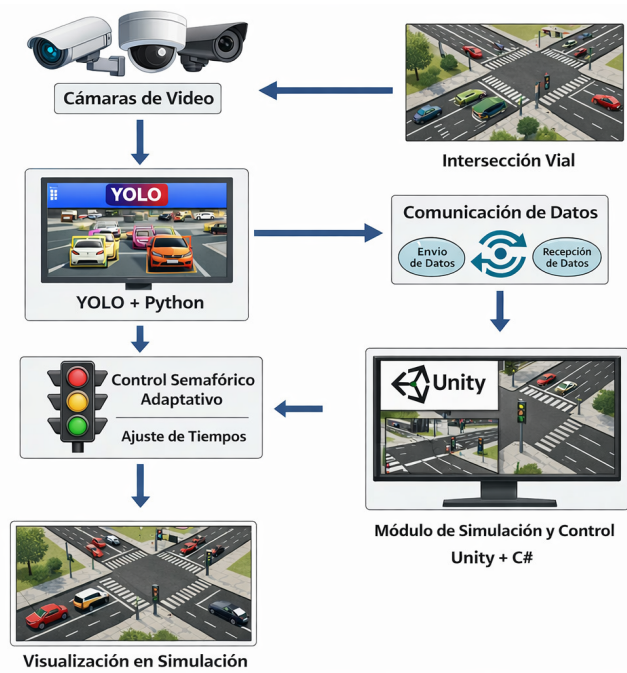


Fig. 4. Arquitectura general del sistema inteligente de control semafórico.

- Conteo vehicular por vía.
- Envío de datos al entorno de simulación.
- Aplicación del algoritmo de control.
- Actualización visual del estado semafórico.

En la primera etapa se realiza la captura de imágenes mediante dispositivos de video o cámaras virtuales. Estas imágenes son procesadas mediante un modelo de detección de objetos basado en redes neuronales convolucionales profundas, específicamente el algoritmo YOLOv8.

Posteriormente, se realiza el conteo de los vehículos detectados en cada vía, generando variables numéricas que representan el flujo vehicular.

Dichos valores son transmitidos al entorno de simulación mediante un protocolo de comunicación en tiempo real. En este entorno, el algoritmo de control analiza las condiciones del tráfico y determina el estado del sistema.

Finalmente, la simulación actualiza los indicadores visuales del semáforo y el comportamiento de los vehículos dentro del escenario virtual.

#### B. Sistema de detección vehicular

Para la detección de vehículos se empleó el modelo YOLOv8, implementado mediante la librería Ultralytics en Python para tareas de detección de objetos, segmentación y clasificación. Este modelo permite identificar objetos en tiempo real dentro de cada fotograma capturado.

YOLO (You Only Look Once) es un algoritmo de detección de objetos basado en redes neuronales convolucionales profundas, el cual realiza predicciones en una sola etapa de análisis de la imagen. Esto permite alcanzar altas velocidades de procesamiento sin comprometer significativamente la pre-

ción, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para aplicaciones de monitoreo de tráfico en tiempo real.

El sistema fue configurado para detectar las principales clases de transporte presentes en entornos urbanos. Estas clases incluyen vehículos livianos, buses, camiones y motocicletas, las cuales son comúnmente utilizadas en estudios de análisis de tráfico.

Como se muestra en la Fig. 5, el modelo de detección identifica diferentes tipos de vehículos mediante cuadros delimitadores generados por el algoritmo YOLOv8 durante el procesamiento de cada fotograma.



Fig. 5. Tipos de vehículos considerados en el sistema de detección vehicular mediante YOLOv8.

Cada detección se filtra mediante un umbral de confianza, garantizando la precisión en el conteo. Este umbral permite descartar detecciones poco confiables que podrían generar errores en la estimación del flujo vehicular.

En esta etapa, cada fotograma capturado es analizado, generando cuadros delimitadores (*bounding boxes*) alrededor de los objetos identificados. A partir de estas detecciones, se contabilizan los vehículos presentes en cada vía. El sistema realiza este análisis de forma periódica cada cierto número de fotogramas con el objetivo de optimizar el rendimiento computacional sin afectar significativamente la precisión del conteo.

El flujo de procesamiento del módulo de visión artificial se muestra en la Fig. 6. Como se observa, el sistema realiza un análisis continuo de imágenes, detección de objetos y conteo por cada vía. Este proceso se ejecuta de manera iterativa durante toda la simulación, generando un flujo constante de datos que representa el estado actual del tráfico.



Fig. 6. Proceso de detección y conteo vehicular mediante YOLOv8.

### C. Comunicación entre módulos

La comunicación entre el módulo de detección (Python) y el entorno de simulación (Unity) se realizó mediante un mecanismo de intercambio de datos en tiempo real basado

en comunicación de red. Para ello, se utilizó el protocolo de datagramas de usuario (UDP) por sus siglas en inglés, un protocolo de transporte ligero que permite transmitir información de manera rápida y eficiente entre aplicaciones que se ejecutan en diferentes procesos.

El módulo de visión artificial envía de forma continua los valores correspondientes al número de vehículos detectados en cada vía. Estos datos se codifican en mensajes simples que contienen la información del flujo vehicular en la vía principal ( $P$ ) y en la vía secundaria ( $S$ ). Estas variables son recibidas por el *script* de control en Unity, permitiendo que el algoritmo adaptativo procese la información y determine el siguiente estado del sistema.

El esquema de comunicación se presenta en la Fig. 7. Una vez recibida la información, el sistema de simulación actualiza las variables internas que representan el flujo vehicular en cada carril. Este mecanismo permite que el entorno responda en tiempo real a los cambios en la cantidad de vehículos detectados, facilitando la implementación de un control dinámico que opera de forma continua y secuencial, garantizando la actualización constante del estado del sistema.

### D. Diseño del algoritmo de control adaptativo

El sistema fue modelado como una máquina de estados finitos (MEF), la cual es un modelo computacional que describe comportamientos reactivos mediante transiciones entre un número limitado de estados, activadas por entradas externas. En este caso, el sistema se compone de cuatro estados principales:

- Principal Verde
- Principal Amarillo
- Secundario Verde
- Secundario Amarillo

El estado rojo no se modela como un estado independiente, sino de forma implícita mediante un mecanismo de exclusión mutua, en el cual la vía opuesta al estado activo permanece en rojo, garantizando así la seguridad operacional del sistema.

El diagrama de estados describe la transición entre los diferentes estados del sistema, la cual se basa en reglas de decisión condicionadas por:

- Número de vehículos detectados en cada vía.
- Presencia de flujo alto simultáneo.
- Ausencia de vehículos en una de las vías.
- Cumplimiento de un tiempo mínimo de seguridad.

El tiempo de luz amarilla fue fijado en 3 segundos como un parámetro de seguridad obligatorio, evitando cambios abruptos que puedan generar situaciones de riesgo. Adicionalmente, el algoritmo incorpora un conjunto de reglas diseñadas para optimizar la distribución del tiempo de luz verde en función de las condiciones del tráfico, considerando diversos escenarios dentro de la intersección simulada.

De forma complementaria, el comportamiento del sistema puede representarse mediante una formulación general del tiempo de luz verde en función del flujo vehicular:

$$T_v = T_{min} + k \cdot (P - S) \quad (1)$$



Fig. 7. Esquema de comunicación entre los módulos.

donde  $T_v$  representa el tiempo de luz verde asignado,  $T_{min}$  es el tiempo mínimo de seguridad,  $P$  y  $S$  corresponden al número de vehículos en la vía principal y secundaria respectivamente, y  $k$  es un factor de ajuste.

No obstante, en la presente investigación se opta por un enfoque basado en reglas discretas, el cual permite una mayor adaptabilidad a escenarios específicos de tráfico y una implementación más eficiente en entornos de simulación en tiempo real.

#### E. Casos de decisión del algoritmo adaptativo

El algoritmo de control semafórico desarrollado considera diversos escenarios de tráfico con el objetivo de asignar dinámicamente el tiempo de luz verde a cada vía. Estos

escenarios se determinan a partir del número de vehículos detectados en la vía principal ( $P$ ) y en la vía secundaria ( $S$ ), valores obtenidos mediante el módulo de visión artificial.

De forma general, el tiempo de luz verde ( $T_g$ ) puede expresarse como una función dependiente del flujo vehicular:

$$T_g = f(P, S) \quad (2)$$

donde  $P$  y  $S$  representan el número de vehículos en la vía principal y secundaria, respectivamente. Esta función se implementa mediante un conjunto de reglas heurísticas que permiten adaptar el comportamiento del sistema en tiempo real.

A partir de estos datos, el sistema evalúa una serie de reglas que permiten priorizar la vía con mayor demanda vehicular, garantizando al mismo tiempo condiciones de seguridad en las transiciones de los estados semafóricos. Los principales casos considerados por el algoritmo se describen a continuación.

1) *Ausencia total de vehículos*: Este caso ocurre cuando no se detectan vehículos en ninguna de las dos vías.

$$P = 0 \quad \text{y} \quad S = 0 \quad (3)$$

En esta situación, el sistema mantiene el estado de luz verde en la vía principal durante un tiempo mínimo preestablecido. Esta decisión evita cambios innecesarios en el estado del semáforo cuando no existe flujo vehicular en la intersección, reduciendo el número de transiciones del sistema y manteniendo la estabilidad operativa.

2) *Vehículos únicamente en una vía*: Este escenario ocurre cuando una vía presenta vehículos mientras que la otra se encuentra completamente vacía. En este caso, el sistema prioriza automáticamente la vía en la que circulan vehículos.

Este comportamiento puede representarse como:

$$(P > 0 \text{ y } S = 0) \quad \text{o} \quad (S > 0 \text{ y } P = 0) \quad (4)$$

Si el semáforo actual se encuentra en verde en una vía sin vehículos y se detecta tráfico en la vía transversal, el algoritmo activa una transición anticipada hacia la fase amarilla con el objetivo de permitir el cambio de estado hacia la vía con flujo vehicular. Esta estrategia permite reducir los tiempos de espera innecesarios para los vehículos presentes en la intersección.

3) *Flujo bajo contra flujo alto*: El sistema contempla un caso especial cuando una vía presenta un número muy reducido de vehículos mientras que la otra registra un flujo considerablemente mayor. En particular, cuando una vía tiene únicamente un vehículo y la vía opuesta presenta un flujo alto de tráfico, el algoritmo asigna únicamente el tiempo mínimo de luz verde.

Matemáticamente, este caso se expresa como:

$$N = 1 \quad \text{y} \quad N_{op} \geq 10 \quad (5)$$

donde  $N$  representa la vía evaluada y  $N_{op}$  la vía opuesta.

Este comportamiento evita que un único vehículo reciba un tiempo excesivo de paso, permitiendo que la vía con mayor acumulación vehicular reciba prioridad en el siguiente ciclo.

4) *Flujo alto simultáneo*: Este escenario ocurre cuando ambas vías presentan un flujo vehicular elevado. Cuando el número de vehículos detectados en ambas direcciones supera el umbral definido como flujo alto, el sistema activa un ciclo de semáforo extendido.

$$P \geq 10 \quad \text{y} \quad S \geq 10 \quad (6)$$

En este caso, el sistema establece un tiempo de luz verde más largo para cada vía dentro del ciclo, permitiendo el paso de una mayor cantidad de vehículos y evitando la acumulación excesiva en ambos carriles.

5) *Prioridad por diferencia alta de tráfico*: Cuando la diferencia entre el número de vehículos detectados en ambas vías supera un umbral alto, el sistema otorga prioridad clara a la vía con mayor demanda. Este caso se define como:

$$|P - S| \geq 8 \quad (7)$$

Si la vía evaluada presenta mayor número de vehículos que la vía opuesta, el algoritmo asigna un tiempo de luz verde largo con el objetivo de reducir rápidamente la congestión acumulada.

6) *Prioridad por diferencia moderada*: En situaciones donde la diferencia de vehículos entre ambas vías es moderada, el sistema asigna un tiempo de luz verde intermedio a la vía con mayor flujo vehicular.

Este caso se expresa como:

$$|P - S| \geq 3 \quad (8)$$

Este umbral es menor que el caso de diferencia alta. En este escenario, el sistema reconoce que existe una mayor demanda en una vía específica, aunque no lo suficientemente grande como para requerir una prioridad extrema.

#### F. Entorno de simulación

Se desarrolló una intersección virtual en Unity que representa dos calles perpendiculares con sus respectivos semáforos. El entorno incluye la generación de vehículos simulados y la representación visual de los estados luminosos del sistema semafórico.

La implementación del entorno se muestra en la Fig. 8.



Fig. 8. Entorno de simulación desarrollado en Unity.

Dentro del entorno virtual se implementaron vehículos simulados capaces de desplazarse a lo largo de los carriles

definidos. Cada vehículo responde al estado del semáforo correspondiente, deteniéndose cuando la luz se encuentra en rojo y avanzando cuando se habilita la luz verde.

El sistema incluye un mecanismo de generación dinámica de vehículos, el cual se ajusta en función de los datos recibidos desde el módulo de detección vehicular. Esto permite representar de manera visual el flujo estimado por el sistema de visión artificial.

La simulación permite observar el comportamiento dinámico del sistema ante diferentes escenarios de tráfico, tales como:

- Tiempo promedio de espera.
- Fluidez vehicular.
- Capacidad de respuesta ante incrementos en la densidad de tráfico.
- Distribución eficiente de los tiempos de luz verde.

Durante las pruebas experimentales se evaluaron múltiples configuraciones de flujo vehicular con el objetivo de analizar la capacidad de respuesta del sistema ante diferentes condiciones de tráfico. Para ello, se realizaron simulaciones considerando escenarios de flujo bajo, medio y alto en cada una de las vías, así como situaciones en las que el flujo vehicular se encontraba desbalanceado entre ambas direcciones.

La evaluación del sistema se centra en analizar la eficiencia del algoritmo adaptativo en la gestión del tráfico vehicular. En particular, se examina su capacidad para optimizar la distribución de los tiempos de luz verde, reducir los tiempos de espera y responder dinámicamente a variaciones en el flujo vehicular. Asimismo, se establece una comparación con un sistema semafórico tradicional de ciclo fijo bajo distintos escenarios de simulación.

### III. PRUEBAS Y RESULTADOS

Para la validación del sistema de semaforización inteligente se diseñó un conjunto de pruebas experimentales orientadas a evaluar su funcionamiento en distintos escenarios de tráfico. En este contexto, se definieron criterios de evaluación relacionados con la seguridad operacional, la secuencia lógica de fases, la temporización, la capacidad de detección vehicular, la respuesta ante fallas y el desempeño general del sistema.

#### A. Protocolo de pruebas del sistema

La validación del sistema semafórico se estructuró en cinco niveles de prueba, con el propósito de verificar tanto el cumplimiento funcional del modelo de control como su capacidad para optimizar el flujo vehicular en los distintos escenarios analizados. Cada nivel de prueba aborda un aspecto específico del sistema, permitiendo una evaluación integral de su comportamiento.

- 1) Prueba lógica del sistema
- 2) Prueba de temporización
- 3) Prueba de detección vehicular
- 4) Prueba de seguridad operacional
- 5) Prueba de desempeño operativo

## B. Prueba lógica del sistema

Esta prueba tuvo como objetivo verificar el funcionamiento correcto de la secuencia semafórica y la coherencia del modelo de control implementado. En particular, se evaluó que el sistema cumpla con la lógica establecida para la alternancia de fases, evitando la presencia de estados inseguros y garantizando una operación segura en todo momento.

Asimismo, se comprobó que cada estado del sistema se active de manera ordenada y en función de las condiciones definidas por el algoritmo, asegurando que las transiciones se realicen de forma progresiva y sin omitir etapas intermedias. De esta manera, se valida que el modelo de control basado en una máquina de estados finitos responda de forma consistente ante los diferentes escenarios de operación.

Para la ejecución de esta prueba, se simuló distintos escenarios de tráfico variando el número de vehículos en la vía principal ( $P$ ) y en la vía secundaria ( $S$ ), observando el comportamiento del sistema ante cada condición. Se verificó que las transiciones entre los estados *Principal Verde*, *Principal Amarillo*, *Secundario Verde* y *Secundario Amarillo* se realicen conforme a las reglas definidas en el algoritmo.

Los resultados evidenciaron que el sistema mantiene una secuencia lógica adecuada en todos los casos evaluados, sin presentar conflictos como la activación simultánea de luces verdes en ambas vías. Asimismo, se comprobó que el estado amarillo actúa correctamente como fase de transición obligatoria, garantizando la seguridad en el cambio de prioridades entre vías.

Adicionalmente, se validó la integración entre el módulo de visión artificial y el módulo de control, verificando que los datos generados por el sistema de detección vehicular (YOLO) son correctamente transmitidos mediante el protocolo UDP hacia el entorno de simulación en Unity. Esto permitió comprobar que las decisiones del algoritmo se basan en información dinámica en tiempo real.

En consecuencia, se concluye que la lógica del sistema es consistente, segura y adecuada para su implementación en el entorno de simulación propuesto.

1) *Fases evaluadas*: Las fases del sistema se organizan en función de la vía de circulación, donde cada una presenta tres estados operativos: verde, amarillo y rojo. En particular, la vía principal opera bajo los estados *Principal Verde*, *Principal Amarillo* y *Principal Rojo*, mientras que la vía secundaria se rige por los estados *Secundario Verde*, *Secundario Amarillo* y *Secundario Rojo*.

2) *Transiciones de estados*: El sistema fue modelado como una máquina de estados finitos, donde cada estado representa una fase del semáforo y las transiciones definen el cambio entre dichas fases.

Se verificó que las transiciones se ejecuten únicamente bajo las condiciones establecidas por el algoritmo, garantizando una secuencia lógica correcta. Estas transiciones se presentan en la Tabla I.

Adicionalmente, la fase roja de una vía actúa de manera complementaria a las fases verde y amarilla de la vía opuesta, evitando cruces simultáneos.

TABLA I  
TRANSICIONES DEL SISTEMA

Estado actual	Siguiente estado
Principal Verde	Principal Amarillo
Principal Amarillo	Secundario Verde
Secundario Verde	Secundario Amarillo
Secundario Amarillo	Principal Verde

3) *Validación de seguridad*: La validación de seguridad tuvo como propósito garantizar que el sistema opere sin generar conflictos en la circulación vehicular o riesgos en la intersección.

Se verificaron los siguientes criterios:

- No existen estados erróneos (luces verdes simultáneas en vías cruzadas)
- Ninguna transición omite estados intermedios
- Cada cambio ocurre únicamente bajo condiciones definidas por el algoritmo
- El estado rojo es complementario al estado activo de la vía opuesta
- El sistema inicia siempre desde un estado seguro

## C. Prueba de temporización semafórica

La prueba de temporización semafórica tuvo como objetivo evaluar la precisión y consistencia de los intervalos de tiempo definidos en el algoritmo de control, mediante la comparación entre los valores programados y los tiempos reales observados durante la operación del sistema. Este análisis permitió verificar que la temporización implementada se ejecute correctamente y en concordancia con las condiciones establecidas en el diseño.

Para ello, se midieron las siguientes variables:

- Tiempo de luz verde ( $T_v$ )
- Tiempo de luz amarilla ( $T_a$ )
- Tiempo de ciclo ( $T_c$ )

El tiempo de ciclo del sistema puede expresarse como la suma de los intervalos correspondientes a cada fase semafórica:

$$T_c = T_{v1} + T_{a1} + T_{v2} + T_{a2} \quad (9)$$

donde  $T_{v1}$  y  $T_{v2}$  representan los tiempos de luz verde para la vía principal y secundaria respectivamente, mientras que  $T_{a1}$  y  $T_{a2}$  corresponden a los tiempos de luz amarilla en cada transición.

A partir de estas mediciones, se comprobó que los intervalos de cada fase se mantienen dentro de los rangos esperados, sin desviaciones significativas que puedan afectar el funcionamiento del sistema. En particular, se verificó que el intervalo de luz amarilla se mantenga constante en 3 segundos, garantizando condiciones seguras de transición entre fases y permitiendo la adecuada liberación de la intersección antes del cambio de estado.

Asimismo, se observó que los tiempos de luz verde se ajustan dinámicamente en función del flujo vehicular detectado,

manteniéndose siempre por encima del tiempo mínimo de seguridad establecido en el sistema.

Adicionalmente, se evaluó el comportamiento del sistema ante variaciones en las condiciones de tráfico, verificando que los cambios en la temporización se realicen de forma estable, sin generar oscilaciones abruptas ni inconsistencias en la secuencia de control. De esta manera, se asegura que el sistema mantiene un equilibrio adecuado entre eficiencia y seguridad en la gestión del tráfico vehicular.

Por tanto, los resultados validan la correcta implementación del modelo de temporización semafórica y su adecuada integración dentro del sistema de control adaptativo.

#### D. Prueba del sistema de detección vehicular

La prueba del sistema de detección vehicular tuvo como propósito evaluar la capacidad del módulo de visión artificial para identificar y contabilizar vehículos de manera confiable en tiempo real, así como analizar su comportamiento ante diferentes condiciones de tráfico.

Para ello, se consideraron los siguientes aspectos de evaluación:

- Precisión en la detección de vehículos
- Tiempo de respuesta del sistema
- Estabilidad ante diferentes niveles de flujo vehicular

El sistema se basa en el modelo YOLO, el cual permite identificar objetos mediante cuadros delimitadores (*bounding boxes*) en cada fotograma del video. A partir de estas detecciones, se realiza el conteo de vehículos considerando únicamente clases relevantes como automóviles, buses, camiones y motocicletas.

Para la obtención del material de prueba se realizó la captura de video desde una posición elevada, utilizando una vista en plano picado de la intersección. Esta configuración permitió disponer de una perspectiva amplia del escenario, reduciendo problemas de oclusión entre vehículos y mejorando la calidad del proceso de detección.

Adicionalmente, el sistema incorpora un mecanismo de seguimiento (*tracking*) que permite identificar objetos a lo largo de múltiples fotogramas, evitando conteos duplicados. Asimismo, se implementaron filtros espaciales basados en distancia mínima entre detecciones, lo que contribuye a reducir falsas detecciones y mejorar la precisión del conteo vehicular.

Los datos obtenidos son procesados en tiempo real y transmitidos mediante el protocolo UDP hacia el entorno de simulación, donde son utilizados como entrada para el algoritmo de control semafórico.

Las pruebas se estructuraron en los siguientes componentes:

- Validación de la detección y conteo vehicular mediante visión artificial
- Evaluación del sistema bajo diferentes niveles de flujo vehicular (bajo, medio y alto)
- Análisis de estabilidad ante variaciones en el número de vehículos detectados

Los resultados evidenciaron que el sistema mantiene un desempeño estable en los distintos escenarios evaluados, permitiendo una detección continua y consistente de los vehículos

presentes en la intersección. Asimismo, se observó que la integración con el módulo de control permite una respuesta dinámica del sistema semafórico en función del flujo vehicular detectado.

En consecuencia, se valida que el sistema de detección vehicular es adecuado para su implementación dentro del modelo de control adaptativo propuesto.

1) *Protocolo experimental*: Para la obtención de los datos se realizaron grabaciones de video durante intervalos de 5 minutos en tres escenarios distintos de congestión vehicular, con el fin de representar diferentes condiciones de tráfico:

- Flujo vehicular bajo
- Flujo vehicular medio
- Flujo vehicular alto

Estos escenarios fueron utilizados para evaluar el comportamiento del sistema de semaforización inteligente en condiciones representativas de operación.

Adicionalmente, se utilizó un video independiente destinado exclusivamente a la validación del sistema de detección vehicular, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos mediante el modelo YOLO frente a un conteo manual considerado como referencia.

Cada video fue analizado mediante dos métodos complementarios:

- Conteo manual de vehículos
- Conteo automático mediante el modelo YOLO

A partir de estos datos se calculó el porcentaje de error del sistema de detección, así como métricas relacionadas con el desempeño completo operativo del sistema de control semafórico. Este análisis permitió evaluar la precisión del modelo de visión artificial y su impacto en la toma de decisiones del sistema.

Los escenarios considerados en las pruebas se resumen en la Tabla II.

TABLA II  
ESCENARIOS DE PRUEBA DEL SISTEMA

Escenario	Duración	Descripción
Flujo bajo	5 min	Bajo flujo vehicular
Flujo medio	5 min	Flujo vehicular moderado
Flujo alto	5 min	Alto flujo vehicular
Validación YOLO	5 min	Comparación entre conteo manual y automático

Como se muestra en la Fig. 9, se presenta una captura del entorno real utilizado para el análisis del sistema. Esta imagen corresponde a una intersección urbana en condiciones normales de operación, permitiendo contextualizar el escenario en el cual se evalúa el sistema de semaforización inteligente.

2) *Prueba del sistema de detección vehicular*: Para esta prueba, se compararon los resultados obtenidos por el sistema automático con los valores obtenidos manualmente, permitiendo cuantificar el error del sistema de detección.

Para la validación del modelo se utilizaron videos capturados desde un puente peatonal elevado, lo que proporciona una vista en plano picado del flujo vehicular, reduciendo significativamente los problemas de oclusión y mejora la visibilidad



Fig. 9. Escenario real de la intersección ubicada en las calles Tarqui y Presidente Córdova.

de los objetos en la escena, permitiendo una evaluación más precisa del desempeño del modelo YOLO.

Como se observa en la Fig. 10, el sistema identifica los vehículos mediante cuadros delimitadores generados por el modelo de visión artificial, permitiendo tanto el conteo como la clasificación de los vehículos detectados.



Fig. 10. Detección de vehículos mediante YOLO en el sector del Arco de Yanuncay la avenida Loja de la ciudad de Cuenca, Ecuador.

El conteo manual de vehículos se realizó mediante la observación directa de los videos, registrando cada vehículo que atraviesa la intersección. Este procedimiento permitió establecer un 0 por ciento de error en el conteo de vehículos para la evaluación del sistema automático basado en visión artificial.

Para cuantificar el desempeño del sistema, se utilizó el porcentaje de error, definido como:

$$Error(\%) = \frac{|N_{manual} - N_{YOLO}|}{N_{manual}} \times 100 \quad (10)$$

donde  $N_{manual}$  representa el número de vehículos contados manualmente y  $N_{YOLO}$  corresponde al número de vehículos detectados por el sistema automático.

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla III, donde se compara el conteo manual y el conteo automático para diferentes tipos de vehículos en condiciones diurnas y nocturnas.

TABLA III  
EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN VEHICULAR

Condición	Tipo	Manual	YOLO	Error (%)
Día	Autos	100	98	2.00
	Motos	14	6	57.14
	Buses	4	4	0.00
	Camiones	15	16	6.67
Noche	Autos	95	95	0.00
	Motos	12	1	91.67
	Buses	9	9	0.00
	Camiones	7	7	0.00
<b>Total</b>		<b>256</b>	<b>236</b>	<b>7.81</b>

Los resultados evidencian que el sistema presenta un comportamiento diferenciado según el tipo de vehículo y las condiciones de iluminación. En términos generales, se obtuvo un error global del 7.81%, lo cual indica una buena aproximación entre el conteo manual y el automático.

En condiciones diurnas, el sistema presenta un mejor desempeño, con un error promedio menor, destacándose en la detección de automóviles, buses y camiones, donde los errores son bajos. Sin embargo, se observan desviaciones en la detección de motocicletas, lo cual se debe principalmente a su menor tamaño, mayor velocidad de desplazamiento y la tendencia a circular en paralelo y a una distancia muy reducida respecto de otros vehículos, o cuando pasan excesivamente cerca de estos, reduciendo la visibilidad efectiva o generando puntos ciegos parciales que dificultan su identificación. Este comportamiento también se asocia a maniobras que no corresponden a una circulación vehicular adecuada, ya que implican situaciones que pueden constituir infracciones a las normas de tránsito.

En el caso de buses y camiones, el sistema presenta alta precisión debido a su mayor tamaño y visibilidad dentro de la escena, lo que facilita su detección por parte del modelo.

Por otro lado, en condiciones nocturnas el rendimiento del sistema disminuye, presentando mayores niveles de error. Esta reducción en la precisión se atribuye a factores como la baja iluminación, la presencia de sombras y la disminución del contraste en la imagen, lo cual afecta la capacidad del modelo para detectar objetos correctamente.

En particular, las motocicletas presentan el mayor nivel de error en condiciones nocturnas, evidenciando una limitación importante del sistema en la detección de objetos pequeños bajo condiciones adversas.

A pesar de estas limitaciones, el sistema mantiene un desempeño general aceptable, demostrando su viabilidad para aplicaciones de monitoreo y control de tráfico en condiciones normales. No obstante, se identifican oportunidades de mejora, especialmente en escenarios nocturnos, mediante el uso de técnicas de mejora de imagen o el entrenamiento del modelo con datos adicionales en condiciones de baja iluminación.

### E. Evaluación del sistema según nivel de flujo vehicular

Se evaluó el desempeño del sistema de semaforización inteligente en la intersección de las vías Presidente Córdova (vía principal) y Tarqui (vía secundaria) de la ciudad de Cuenca, Ecuador considerando diferentes niveles de flujo vehicular generados en el entorno de simulación.

El objetivo de esta etapa fue analizar la capacidad del sistema para adaptarse dinámicamente a la demanda del tráfico, optimizando la asignación del tiempo semafórico en función del flujo vehicular detectado.

Para la evaluación se consideraron variables como el número de vehículos detectados, el tiempo de espera promedio, la duración del tiempo de luz verde y la eficiencia en la evacuación vehicular por ciclo semafórico.

En la Fig. 11, el sistema fue implementado en un entorno de simulación desarrollado en Unity, lo que permitió replicar el comportamiento del tráfico en condiciones controladas y sin interferencias externas propias de un entorno real.



Fig. 11. Entorno de simulación del sistema semafórico desarrollado en Unity.

En este entorno, los vehículos responden dinámicamente a los estados del semáforo, permitiendo observar la interacción entre el flujo vehicular y la lógica de control implementada. Como se observa en la Fig. 12, los vehículos se detienen durante la fase roja y continúan su desplazamiento durante la fase verde, reproduciendo condiciones similares a un escenario urbano real.

1) *Resultados generales de detección:* Los resultados obtenidos para ambas vías se presentan en la Tabla IV.

A partir de estos resultados se observa una ligera diferencia entre el conteo manual y automático, atribuida principalmente a oclusiones entre vehículos, condiciones de iluminación y superposición en escenarios de tráfico denso.

2) *Error de detección por vía:* El error porcentual se calcula mediante la expresión:

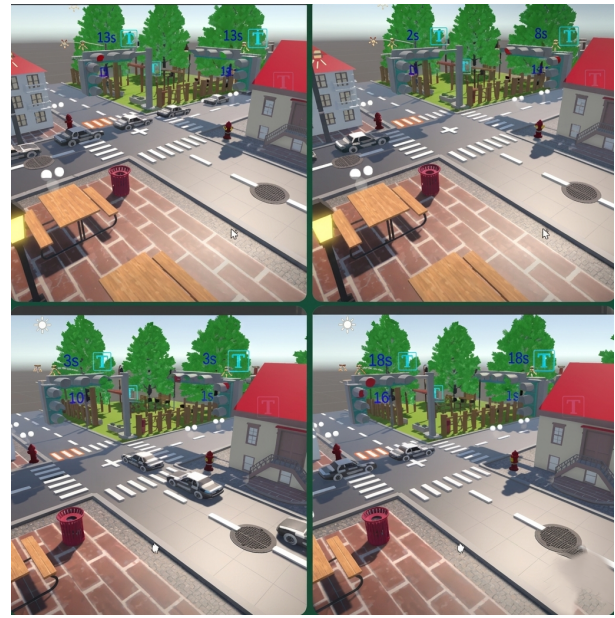


Fig. 12. Comportamiento de los vehículos en función del estado del semáforo.

TABLA IV  
COMPARACIÓN GLOBAL ENTRE CONTEO MANUAL Y YOLO

Vía	Método	Total vehículos	Observación
Principal	YOLO	270	Detección automática
Principal	Manual	281	Referencia base
Secundaria	YOLO	237	Detección automática
Secundaria	Manual	256	Referencia base

$$E = \frac{|V_{manual} - V_{YOLO}|}{V_{manual}} \times 100 \quad (11)$$

donde:

- $V_{manual}$  representa el conteo manual de vehículos
- $V_{YOLO}$  representa el conteo automático mediante YOLO

Los resultados del error por vía se presentan en la Tabla V.

TABLA V  
ERROR PORCENTUAL DE DETECCIÓN POR VÍA

Vía	Manual	YOLO	Error (%)
Principal	281	270	3.91
Secundaria	256	237	7.42
Promedio	-	-	5.67

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el sistema presenta un error promedio de 5.67%, lo que indica un alto nivel de precisión del modelo YOLO aplicado al entorno de monitoreo vehicular.

Las diferencias encontradas se deben principalmente a factores como oclusión entre vehículos, variaciones en la iluminación y superposición en escenarios de tráfico.

Sin embargo, el comportamiento general del sistema demuestra una adecuada capacidad de detección y seguimiento, lo que permite su aplicación en sistemas de semaforización inteligente.

En conjunto, estos resultados validan la efectividad del sistema propuesto para la estimación del flujo vehicular en tiempo real, manteniendo un equilibrio entre precisión y robustez en condiciones urbanas reales.

#### F. Prueba de seguridad ante fallas

Con el fin de garantizar la operación segura del sistema de semaforización inteligente, se analizaron diferentes escenarios de falla que podrían comprometer su funcionamiento. Aunque el sistema propuesto se desarrolla en un entorno controlado, se consideraron condiciones reales de operación para definir mecanismos de respuesta adecuados.

Los principales eventos evaluados fueron:

- Pérdida de señal de cámara o desconexión del sistema de visión
- Ausencia de detección vehicular o datos congelados
- Fallas en la comunicación entre el sistema inteligente y el controlador semafórico

Para cada uno de estos casos, se establecieron estrategias de respuesta orientadas a garantizar la seguridad vial y evitar estados no contemplados en la intersección.

El sistema incluye un monitoreo básico de la información recibida. Cuando se detecta ausencia de datos o comportamientos anómalos en la detección, el algoritmo deja de utilizar la información de entrada y evita tomar decisiones basadas en datos no confiables.

1) *Arquitectura del sistema y nivel de actuación:* El sistema de semaforización inteligente puede entenderse como una arquitectura de tres niveles:

- **Capa de percepción:** donde se realiza la detección de vehículos mediante visión artificial (YOLO).
- **Capa de control lógico:** donde se ejecuta el algoritmo de decisión basado en una máquina de estados finitos, encargado de definir las fases semafóricas.
- **Capa de campo:** correspondiente al controlador físico de los semáforos (PLC o controlador dedicado), responsable de accionar las luces semafóricas.

En este enfoque, el sistema inteligente actúa como una capa superior de control, mientras que el sistema semafórico convencional mantiene su lógica base de funcionamiento.

2) *Modo de operación ante pérdida de comunicación:* En un escenario real, el sistema inteligente se conecta al controlador semafórico como un módulo externo que envía comandos de operación. Sin embargo, el controlador físico dispone internamente de un programa de respaldo basado en tiempos fijos.

Cuando se presenta una falla en la comunicación (por ejemplo, pérdida de conexión, error del sistema o interrupción del flujo de datos), el controlador detecta la ausencia de comandos externos mediante un mecanismo de temporización (*timeout*).

Ante esta situación, el controlador ejecuta automáticamente las siguientes acciones:

- Desactiva la recepción de comandos del sistema inteligente

- Retoma el control local del sistema semafórico
- Activa su programa interno de tiempos fijos

Este comportamiento permite que el sistema continúe operando de manera autónoma y segura, sin depender del sistema de visión artificial o del algoritmo adaptativo.

El ciclo de operación en modo seguro se basa en tiempos previamente configurados, 40 segundos por ejemplo, que se ha ajustado en función de condiciones de las vías.

3) *Nivel de seguridad y comportamiento del sistema:* El retorno al modo de tiempos fijos ocurre en la **capa de campo**, ya que es el controlador físico el encargado de garantizar la operación segura del sistema ante cualquier falla externa.

Esto implica que:

- Si falla la detección (capa de percepción), el sistema deja de recibir datos confiables
- Si falla el control lógico, no se envían comandos al controlador
- En ambos casos, el controlador semafórico mantiene la operación segura mediante su programa interno

De esta manera, el sistema inteligente no reemplaza el funcionamiento del semáforo tradicional, sino que lo complementa como un módulo de optimización.

4) *Acciones de protección:* Ante condiciones de falla, el sistema garantiza un comportamiento seguro mediante:

- Suspensión del control adaptativo basado en detección vehicular
- Evitar decisiones basadas en datos inválidos
- Continuidad de operación mediante el sistema de tiempos fijos del controlador

5) *Justificación del diseño:* Este enfoque responde al principio de diseño *fail-safe*, ampliamente utilizado en sistemas de control, donde ante cualquier falla el sistema debe pasar a un estado seguro y conocido.

En este caso, el estado seguro corresponde al funcionamiento con tiempos fijos, el cual garantiza:

- Ausencia de conflictos semafóricos
- Operación continua del sistema
- Comportamiento predecible en la intersección

Aunque este comportamiento no fue implementado físicamente en el presente proyecto, su análisis permite validar que el sistema propuesto es compatible con infraestructuras reales y cumple con criterios básicos de seguridad operacional.

6) *Aplicación en el sistema implementado:* En el sistema desarrollado, estos mecanismos de seguridad se reflejan de forma parcial a nivel de software.

En la capa de percepción, el sistema basado en YOLO puede presentar ausencia de detección en ciertos frames. Para mitigar este efecto, se implementa un mecanismo de suavizado mediante el uso de buffers, evitando cambios bruscos en la cantidad de vehículos detectados.

En la capa de comunicación, el envío de datos entre el sistema de visión (Python) y el entorno de simulación (Unity) se realiza mediante protocolo UDP. En caso de pérdida de datos o interrupciones, el sistema de control mantiene el último estado válido, evitando transiciones inestables.

En la capa de control lógico, el algoritmo implementado en Unity incorpora tiempos mínimos de verde, lo que garantiza que no se produzcan cambios abruptos en las fases semafóricas ante variaciones momentáneas o errores en la detección.

Si bien no se implementa un controlador físico real, el comportamiento del sistema simula el principio de operación de un sistema con respaldo, donde ante la ausencia de información confiable se mantiene un estado seguro y estable.

Esto demuestra que el sistema desarrollado, incluso en un entorno simulado, considera criterios básicos de seguridad operacional y comportamiento tolerante a fallos.

### G. Prueba de desempeño operativo

Esta prueba tuvo como objetivo evaluar el funcionamiento del sistema de semaforización inteligente propuesto en comparación con un sistema tradicional de tiempos fijos, con el fin de analizar su impacto en la eficiencia del tráfico vehicular.

El análisis se centró en los siguientes indicadores:

- Capacidad de adaptación al flujo vehicular
- Aprovechamiento del tiempo de luz verde
- Representación del flujo mediante detección vehicular

El sistema de referencia corresponde a un ciclo fijo de 40 segundos, mientras que el sistema propuesto ajusta dinámicamente el tiempo verde en función del flujo vehicular detectado mediante visión artificial.

1) *Comparación con sistema de tiempos fijos:* La comparación entre ambos enfoques se presenta en la Tabla VI.

TABLA VI  
COMPARACIÓN CONCEPTUAL ENTRE SISTEMA DE TIEMPOS FIJOS Y SISTEMA ADAPTATIVO

Característica	Sistema fijo	Sistema adaptativo
Duración del ciclo	Constante (40 s)	Variable según flujo vehicular
Asignación de verde	Predefinida	Basada en detección (YOLO)
Uso del tiempo verde	Puede desperdiciarse	Optimizado dinámicamente
Respuesta al tráfico	No responde	Responde en tiempo real
Dependencia de sensores	No	Sí (visión artificial)

En el sistema de tiempos fijos, la duración del ciclo permanece constante independientemente de la cantidad de vehículos presentes, lo que puede generar tiempos de espera innecesarios o la activación de fases sin demanda vehicular.

En contraste, el sistema adaptativo utiliza la información obtenida mediante el modelo de detección para ajustar dinámicamente la duración de la luz verde, priorizando las vías con mayor flujo vehicular en tiempo real.

Esto permite un mejor aprovechamiento del tiempo disponible, reduciendo la activación de fases sin vehículos y mejorando la eficiencia operativa del sistema.

2) *Análisis basado en resultados experimentales:* Con el fin de complementar el análisis del sistema, se presenta una evaluación detallada del desempeño de detección a partir de los cinco videos analizados.

A diferencia del análisis global presentado previamente, en esta sección se examina el comportamiento del sistema en cada escenario de manera individual, lo que permite identificar variaciones en el error de detección en función de las condiciones específicas del tráfico.

TABLA VII  
ERROR DE DETECCIÓN POR VIDEO

Vía	Video	Manual	YOLO	Error (%)
Principal	Video 1	66	75	13.64
Principal	Video 2	64	59	7.81
Principal	Video 3	45	39	13.33
Principal	Video 4	45	42	6.67
Principal	Video 5	61	55	9.84
Secundaria	Video 1	50	44	12.00
Secundaria	Video 2	41	37	9.76
Secundaria	Video 3	66	61	7.58
Secundaria	Video 4	58	52	10.34
Secundaria	Video 5	41	43	4.88

Los resultados por video se muestran en la Tabla VII.

Como se observa en la Tabla VII, el error del sistema presenta variaciones entre los distintos videos analizados, lo cual evidencia la influencia de las condiciones específicas de cada escenario sobre el desempeño del modelo de detección.

En la vía principal, los errores más altos se registran en los Videos 1 y 3, con valores de 13.64% y 13.33% respectivamente. Estos resultados pueden estar asociados a una mayor densidad vehicular o a la presencia de oclusiones entre vehículos, lo que dificulta la correcta detección por parte del modelo. Por otro lado, el menor error se presenta en el Video 4 (6.67%), indicando un escenario con mejores condiciones de visibilidad o menor complejidad en el flujo vehicular.

En la vía secundaria, el comportamiento del sistema es más estable, con errores que oscilan entre 4.88% y 12.00%. El menor error se observa en el Video 5, lo que sugiere condiciones favorables para la detección, mientras que el mayor error se presenta en el Video 1, posiblemente debido a variaciones en la distribución o interacción de los vehículos.

De manera general, se puede observar que el sistema tiende a presentar mayores errores en escenarios con mayor complejidad del tráfico, mientras que su desempeño mejora en condiciones más ordenadas o con menor densidad vehicular.

A pesar de estas variaciones, todos los valores se mantienen dentro de márgenes confiables para las aplicaciones de monitoreo de tráfico, lo que confirma la capacidad del modelo YOLO para representar de manera adecuada el flujo vehicular en diferentes condiciones.

Este análisis por escenario permite validar la consistencia del sistema, evidenciando que, aunque existen fluctuaciones en el error, el comportamiento general se mantiene estable y confiable para su integración en el sistema de control semafórico adaptativo.

3) *Análisis del tiempo verde desaprovechado:* Con el fin de evaluar la eficiencia del sistema, se analizó el tiempo de luz verde desaprovechado utilizando los cinco videos de prueba.

En el sistema de tiempos fijos, se establece un ciclo constante de 40 segundos, donde el tiempo verde se asigna sin considerar la presencia real de vehículos. Esto genera intervalos en los cuales la luz verde permanece activa sin flujo vehicular, especialmente en escenarios de bajo tráfico.

Por otro lado, el sistema adaptativo ajusta dinámicamente el tiempo verde en función de la detección vehicular, reduciendo

significativamente estos intervalos sin uso.

Para este análisis, se registraron los siguientes valores en cada video:

- Tiempo total de luz verde
- Tiempo de luz verde sin vehículos

A partir de estos datos, se calculó el porcentaje de desperdicio mediante:

$$Desperdicio(\%) = \frac{T_{sin\ vehiculos}}{T_{verde\ total}} \times 100 \quad (12)$$

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema de tiempos fijos presenta un desperdicio promedio de tiempo verde del 16%, valor obtenido a partir del promedio de los intervalos sin presencia vehicular registrados en los videos analizados.

En contraste, el sistema adaptativo reduce este valor a aproximadamente un 5%, gracias a su capacidad de ajustar dinámicamente la duración de la luz verde en función del flujo vehicular detectado en tiempo real.

Esta diferencia demuestra una mejora significativa en la eficiencia del uso del tiempo semafórico, especialmente en escenarios donde el flujo vehicular es variable, gracias a su capacidad de ajustar dinámicamente la duración de la luz verde en función del flujo vehicular detectado.

4) *Mejora del sistema:* Para evaluar la mejora del sistema, se calcularon diferentes indicadores comparando el desempeño del sistema de tiempos fijos frente al sistema adaptativo, utilizando los datos obtenidos en los videos analizados.

Se determinó la reducción del tiempo verde desaprovechado mediante la siguiente expresión:

$$Reducción_{desperdicio}(\%) = \frac{D_{fijo} - D_{adaptativo}}{D_{fijo}} \times 100 \quad (13)$$

donde  $D_{fijo}$  representa el porcentaje de tiempo verde asignado sin presencia de vehículos en el sistema de tiempos fijos, mientras que  $D_{adaptativo}$  corresponde al porcentaje de tiempo verde desaprovechado en el sistema adaptativo.

La ecuación permite determinar qué porcentaje del tiempo verde desperdiciado en el sistema tradicional fue reducido mediante la implementación del sistema adaptativo.

De igual manera, la reducción del tiempo de espera promedio de los vehículos se calculó mediante:

$$Reducción_{espera}(\%) = \frac{T_{fijo} - T_{adaptativo}}{T_{fijo}} \times 100 \quad (14)$$

donde  $T_{fijo}$  es el tiempo de espera promedio en el sistema tradicional y  $T_{adaptativo}$  el tiempo de espera promedio en el sistema propuesto.

Por otro lado, el incremento del flujo vehicular se obtuvo a partir de la siguiente relación:

$$Incremento_{flujo}(\%) = \frac{F_{adaptativo} - F_{fijo}}{F_{fijo}} \times 100 \quad (15)$$

donde  $F_{fijo}$  corresponde al número de vehículos contabilizados en el sistema tradicional y  $F_{adaptativo}$  al número de vehículos registrados con el sistema adaptativo.

La mejora del sistema adaptativo se evaluó a partir de los valores promedio obtenidos en los cinco videos analizados, cuyos resultados se presentan en la Tabla VIII.

TABLA VIII  
MEJORA PORCENTUAL PROMEDIO DEL SISTEMA ADAPTATIVO FRENTE AL SISTEMA TRADICIONAL

Indicador	Mejora (%)
Reducción del tiempo de espera	17.91
Incremento del flujo vehicular	27.79
Reducción del tiempo verde desaprovechado	70.00

Cabe destacar que los valores presentados en la Tabla VIII corresponden a mejoras porcentuales promedio calculadas a partir de los resultados obtenidos en cada uno de los videos analizados.

Los resultados muestran que el sistema adaptativo logra una reducción significativa del tiempo verde desaprovechado, alcanzando un 70%, lo que evidencia una mejor utilización del ciclo semafórico.

Asimismo, se observa una disminución del tiempo de espera promedio de los vehículos del 17.91%, lo que contribuye a una circulación más eficiente y a la reducción de congestión en la intersección analizada.

Finalmente, el flujo vehicular presenta un incremento del 27.79%, indicando que el sistema permite el paso de un mayor número de vehículos en el mismo intervalo de tiempo.

En conjunto, estos resultados demuestran que el sistema propuesto mejora significativamente la gestión del tráfico vehicular en comparación con el sistema de tiempos fijos, validando su eficacia en escenarios urbanos reales.

5) *Impacto del sistema en la gestión del tráfico:* Los resultados obtenidos permiten evidenciar que la implementación de un sistema de semaforización adaptativo basado en detección vehicular tiene un impacto positivo en la gestión del tráfico urbano.

La reducción del tiempo de espera y del tiempo verde desaprovechado contribuye a una circulación más eficiente, disminuyendo la congestión en la intersección evaluada.

Además, la capacidad del sistema para adaptarse en tiempo real a las condiciones del tráfico representa una ventaja significativa frente a los sistemas tradicionales de tiempos fijos, los cuales no consideran la variabilidad del flujo vehicular.

Este comportamiento permite no solo mejorar la eficiencia del sistema, sino también optimizar el uso de la infraestructura vial existente, sin necesidad de modificaciones físicas en la intersección, lo que implicaría obra civil y en consecuencia mayores costos.

En este contexto, el sistema propuesto se presenta como una alternativa viable y escalable para la modernización de sistemas de control de tráfico en entornos urbanos.

#### IV. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió desarrollar un sistema de semaforización inteligente basado en visión por computa-

dora e inteligencia artificial, demostrando su viabilidad como alternativa frente a los sistemas tradicionales.

El sistema propuesto, evaluado en un ambiente simulado, logró adaptarse dinámicamente al flujo vehicular, optimizando la asignación del tiempo de luz verde y reduciendo los tiempos de espera. Asimismo, se evidenció una disminución del tiempo de luz verde desaprovechado.

El modelo de detección basado en YOLO presentó un desempeño adecuado, con un nivel de error aceptable para aplicaciones en tiempo real, aunque con limitaciones en condiciones específicas como baja iluminación.

El algoritmo de control demostró ser estable, seguro y eficiente, garantizando una correcta operación del sistema sin generar conflictos.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el sistema propuesto constituye una solución viable, eficiente y escalable para la mejora de la movilidad urbana.

Como trabajo futuro, se plantea la implementación en entornos reales, la mejora del modelo de detección y la incorporación de técnicas avanzadas de control inteligente.

#### A. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos evidencian que el sistema de semaforización inteligente propuesto presenta un desempeño superior en comparación con los sistemas tradicionales de control de tráfico basados en tiempos fijos.

La integración del modelo de visión artificial permitió representar de manera adecuada el flujo vehicular en tiempo real, lo cual constituye la base para la toma de decisiones del sistema. A pesar de presentar ciertos niveles de error, especialmente en condiciones nocturnas y en la detección de motocicletas, el sistema mantiene un nivel de precisión adecuado para aplicaciones de control adaptativo.

El algoritmo basado en una máquina de estados finitos demostró ser estable y eficiente, garantizando una correcta secuencia semafórica sin conflictos. Además, la incorporación de reglas heurísticas permitió una adaptación dinámica a diferentes escenarios de tráfico.

Uno de los resultados más relevantes corresponde a la reducción del tiempo de luz verde desaprovechado, lo cual evidencia una mejora directa en la eficiencia del sistema. Este comportamiento demuestra que el sistema asigna recursos de manera reactiva en comparación con los enfoques tradicionales.

En términos generales, los resultados confirman que el sistema propuesto permite mejorar la gestión del tráfico sin necesidad de modificar la infraestructura física existente.

1) *Limitaciones del sistema:* A pesar de los resultados positivos, el sistema presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas.

Una de las principales limitaciones es la dependencia de las condiciones de iluminación, lo que afecta la precisión del sistema en escenarios nocturnos. Asimismo, la detección de objetos pequeños como motocicletas presenta mayores niveles de error debido a su tamaño y comportamiento dinámico.

Otra limitación importante es que el sistema fue evaluado en un entorno de simulación, lo cual no contempla completamente las condiciones reales de operación, como factores climáticos o variabilidad en el comportamiento de los conductores.

Adicionalmente, el algoritmo de control basado en reglas heurísticas puede limitar la optimización frente a métodos más avanzados como el aprendizaje automático.

Finalmente, la dependencia de la comunicación en tiempo real puede representar un punto crítico en caso de fallas de red.

2) *Propuesta de mejora y escalabilidad del sistema:* Con el fin de mejorar el sistema, se propone el uso de bases de datos más amplias para el entrenamiento del modelo, incluyendo condiciones nocturnas y escenarios complejos. Asimismo, la implementación de técnicas de mejora de imagen permitiría incrementar la precisión en condiciones adversas.

Desde el punto de vista del control, se recomienda el uso de algoritmos más avanzados como aprendizaje por refuerzo, que permitan optimizar automáticamente los tiempos semafóricos.

En cuanto a la escalabilidad, el sistema puede ampliarse mediante la interconexión de múltiples intersecciones, gestionadas por un servidor central o mediante tecnologías IoT, permitiendo una gestión coordinada del tráfico a nivel urbano.

Además, se sugiere la incorporación de funcionalidades como la priorización de vehículos de emergencia y el análisis predictivo del tráfico.

Finalmente, se recomienda la implementación del sistema en un entorno real para validar su desempeño bajo condiciones operativas.

#### REFERENCIAS

- [1] INRIX, "Inrix 2022 global traffic scorecard: London tops list as uk's most congested city," Informe en línea, 2022, [En línea]. Accedido: 17-nov-2025. [Online]. Available: <https://inrix.com/press-releases/2022-global-traffic-scorecard-uk/>
- [2] CAF, Banco de Desarrollo de América Latina, "Informe anual 2022. el banco verde de américa latina y el caribe," Informe anual, Caracas, Venezuela, 2022, [En línea]. Accedido: 17-nov-2025. [Online]. Available: [https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/2021/ESP\\_IA\\_CAF2022\\_20230628\\_BR.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/2021/ESP_IA_CAF2022_20230628_BR.pdf?sequence=6&isAllowed=y)
- [3] S. Arias, "Política nacional de movilidad urbana sostenible," Documento en línea, Quito, Ecuador, 2023, [En línea]. Accedido: 17-nov-2025. [Online]. Available: <https://www.mit.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/10/Politica-Nacional-de-Movilidad-Urbana-Sostenible-del-Ecuador-2023.pdf>
- [4] International Energy Agency, "World energy outlook 2023," Informe en línea, París, Francia, 2023, [En línea]. Accedido: 17-nov-2025. [Online]. Available: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf>
- [5] Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador, "Acuerdo ministerial nro. 046," Documento en línea, Quito, Ecuador, 2021, [En línea]. Disponible en: Ministerio del Ambiente y Agua del Ecuador. [Online]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/10/Acuerdo-Ministerial-Nro.-046-producto.pdf>
- [6] Organización Mundial de la Salud, "Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2023," Informe en línea, 2023, [En línea]. Accedido: 18-nov-2025. [Online]. Available: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/379049/9789240100534-spa.pdf?sequence=1>
- [7] M. Raza, M. Kazmi, H. M. Kidwai, H. R. Khan, S. A. Qazi, K. Arshad, and K. Assaleh, "An edge-deployed real-time adaptive traffic light control system using yolo-based vehicle detection and pce-aware density estimation," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 153 586–153 613, 2025.

- [8] M. V. Bances Santamaría and M. F. Ramos Moscol, "Semáforos inteligentes para la regulación del tráfico vehicular," *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 1, no. 1, p. 37, 2015.
- [9] O. Fucik, P. Zemcik, P. Tupec, L. Crha, and A. Herout, "The networked photo-enforcement and traffic monitoring system unicam," in *Proceedings of the 11th IEEE International Conference and Workshop on the Engineering of Computer-Based Systems*, 2004, pp. 423–428.
- [10] M. Abubeker K, G. Rekhamole, T. Divya D, S. Drishya S, M. Minu J, S. Sumisha M, and V. Rajimol, "Computer vision assisted artificial intelligence enabled smart traffic control system for urban transportation management," in *2023 Annual International Conference on Emerging Research Areas: International Conference on Intelligent Systems (AICERA/ICIS)*, 2023, pp. 1–5.
- [11] D. Sivaganesan, S. B. Kumar, S. Krishnadarani, and G. Rashmitha, "Optimization of vehicular congestion control in traffic signals using yolo algorithm," in *2024 International Conference on Smart Systems for Electrical, Electronics, Communication and Computer Engineering (ICSSECC)*, 2024, pp. 343–348.
- [12] S. Divyesh, P. Vibusha, and P. Chitra, "Dynamic traffic flow optimization with yolo-based object detection," in *2024 International Conference on Smart Technologies for Sustainable Development Goals (ICSTSDG)*, 2024, pp. 1–6.
- [13] A. Revadala, S. R. C. Reddy, R. K. J, and M. Kumar, "Efficient intelligent based compliance, detection, tracking, and proximity model for traffic system," in *2024 International Conference on Intelligent Systems for Cybersecurity (ISCS)*, 2024, pp. 1–6.
- [14] V. Mishra, S. Shukla, S. K. Singh, S. Srivastava, and A. Garg, "Real-time adaptive traffic control system with emergency vehicle detection based on computer vision and sound frequency monitoring," in *2025 2nd International Conference on Research Methodologies in Knowledge Management, Artificial Intelligence and Telecommunication Engineering (RMKMATE)*, 2025, pp. 1–6.