

CONTROL ADAPTATIVO DE TRÁFICO URBANO EN SAN LUIS UTILIZANDO NODOS CON ESP32-CAM

Alumno: Juan Tiago Ruiz Rodriguez
Director: Mg. Ing. Roberto A. Kiessling



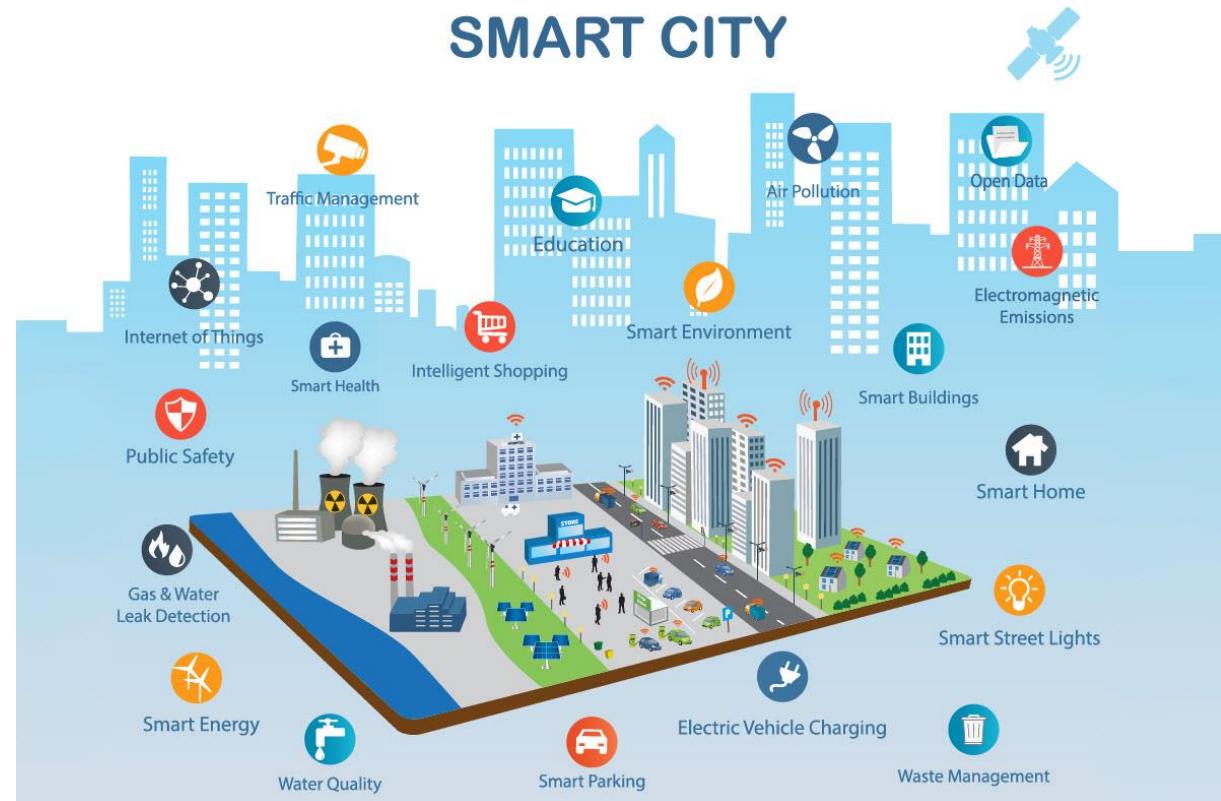
Agenda

- Marco teórico: ciudades inteligentes y control adaptativo de tráfico.
- Simulaciones de prueba de algoritmos.
- Arquitectura y funcionamiento del sistema propuesto.
- Evaluación del rendimiento en campo.
- Simulación realista.
- Limitaciones del proyecto.
- Trabajo futuro.
- Conclusiones.

Ciudades Inteligentes

¿Qué define a una Ciudad Inteligente?

- Tecnología (IoT): Interconexión de objetos, infraestructura y personas.
- Uso de datos: Recolección y análisis de datos en tiempo real.
- Objetivo: Mejorar la calidad de vida, la eficiencia de los servicios y la sostenibilidad.
- El ciudadano al centro: La tecnología como medio, no fin.



Problemática del control de tráfico actual

El problema:

- Sistema actual funciona bien bajo condiciones consistentes pero condiciones cambian (clima, horas pico, eventos, etc.).

Los sistemas de control adaptativo de tráfico buscan resolver esto mediante:

- Priorizar vías con mayor tráfico.
- Reduciendo tiempos de verde para fases en desuso.
- Coordinando ondas verde.
- Ajustándose a actividad de peatones.



En vez de adivinar como será el tráfico, respondemos a lo que está pasando

Soluciones adaptativas existentes

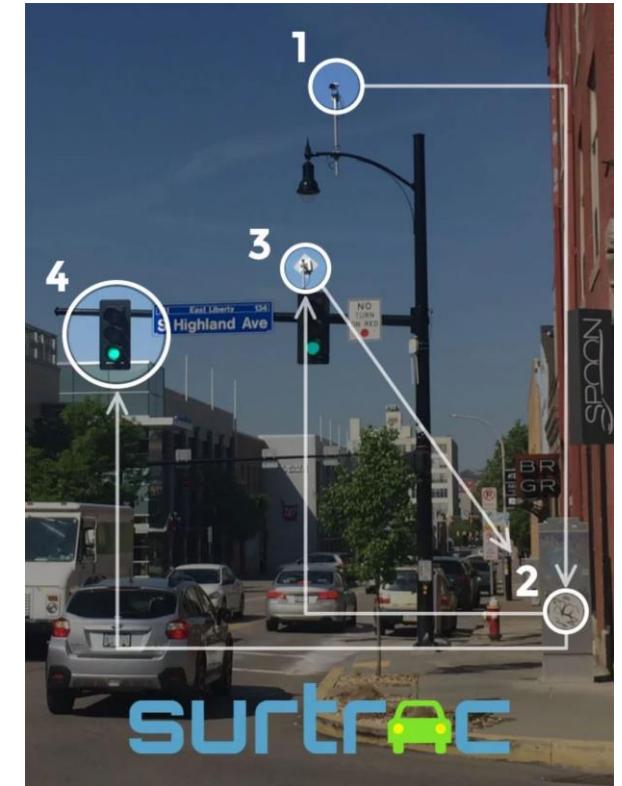
El rol de la ciudad inteligente:

- No es un lujo, es una necesidad operativa.
- Optimiza recursos existentes sin modificar infraestructura vehicular.

Limitantes:

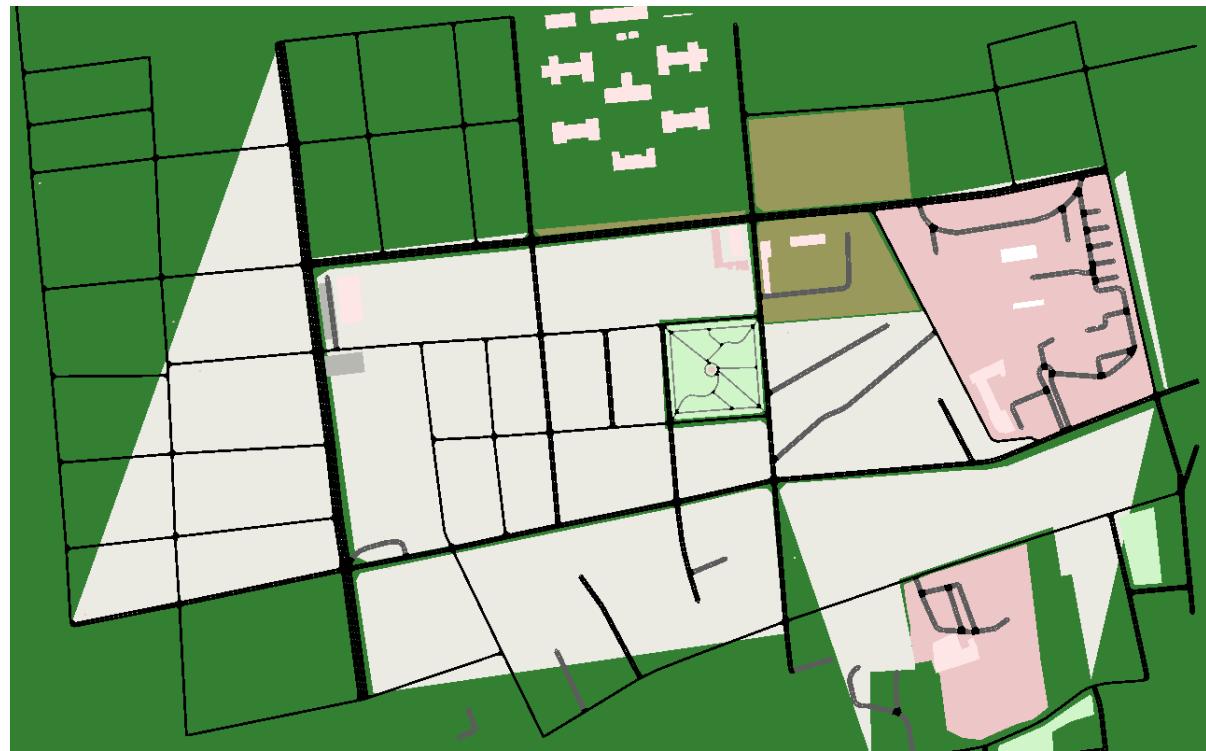
- Las soluciones comerciales tienen costos prohibitivos (\$20000-\$80000 USD por intersección)
- Tienen problemas de privacidad
- Utilizan servidores centrales costosos y limitantes.

¿Cómo controlar el tráfico más eficientemente?



Diseño del escenario de Simulación

Primer paso: Compara alternativas de algoritmos de control de tráfico



Plataforma utilizada: SUMO (Simulation of Urban Mobility)

- Software de simulación de tráfico que modela vehículos en redes urbanas.

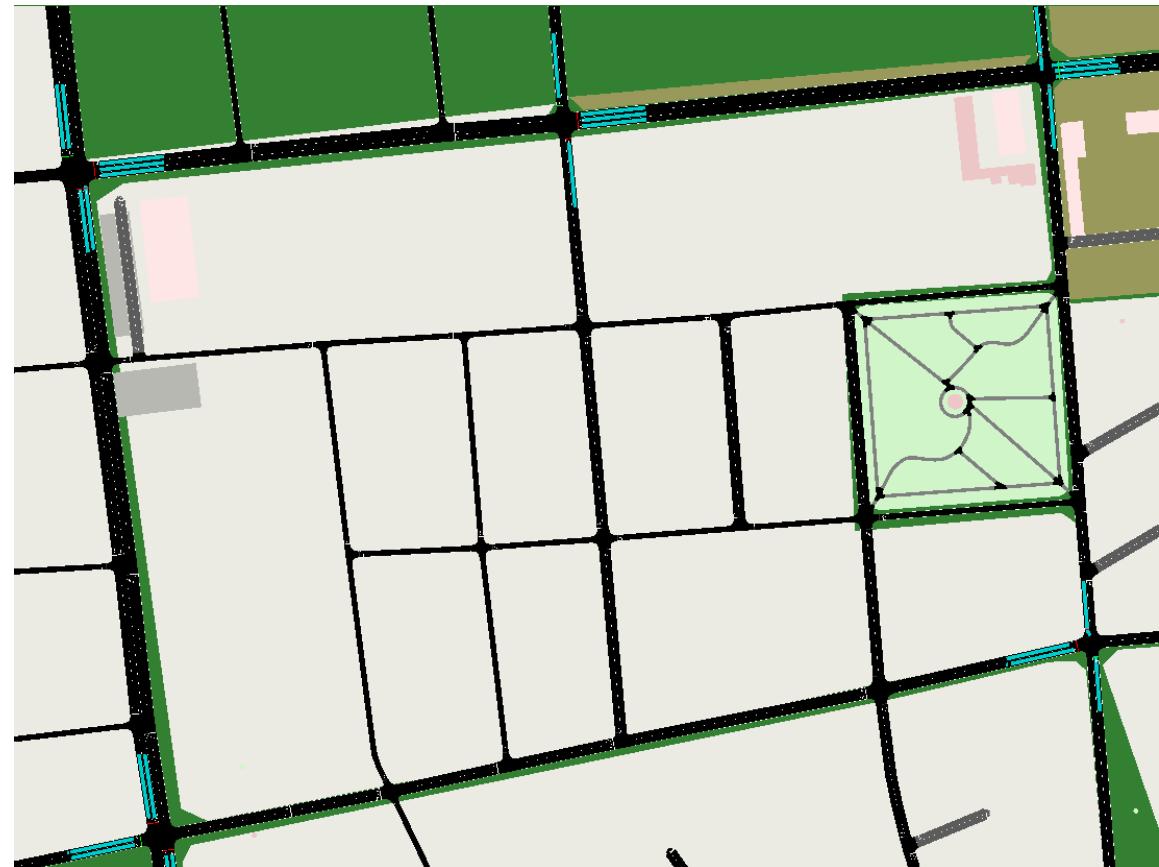
Zona de estudio en San Luis

- Ejes E-O: Hipólito Yrigoyen / Monseñor Orzali.
- Ejes N-S: Las Heras / Pringles.
- Arterias Críticas incluidas: Héroes de Malvinas y Rep. del Líbano/Ciudad del Rosario.

Configuración del escenario de Simulación

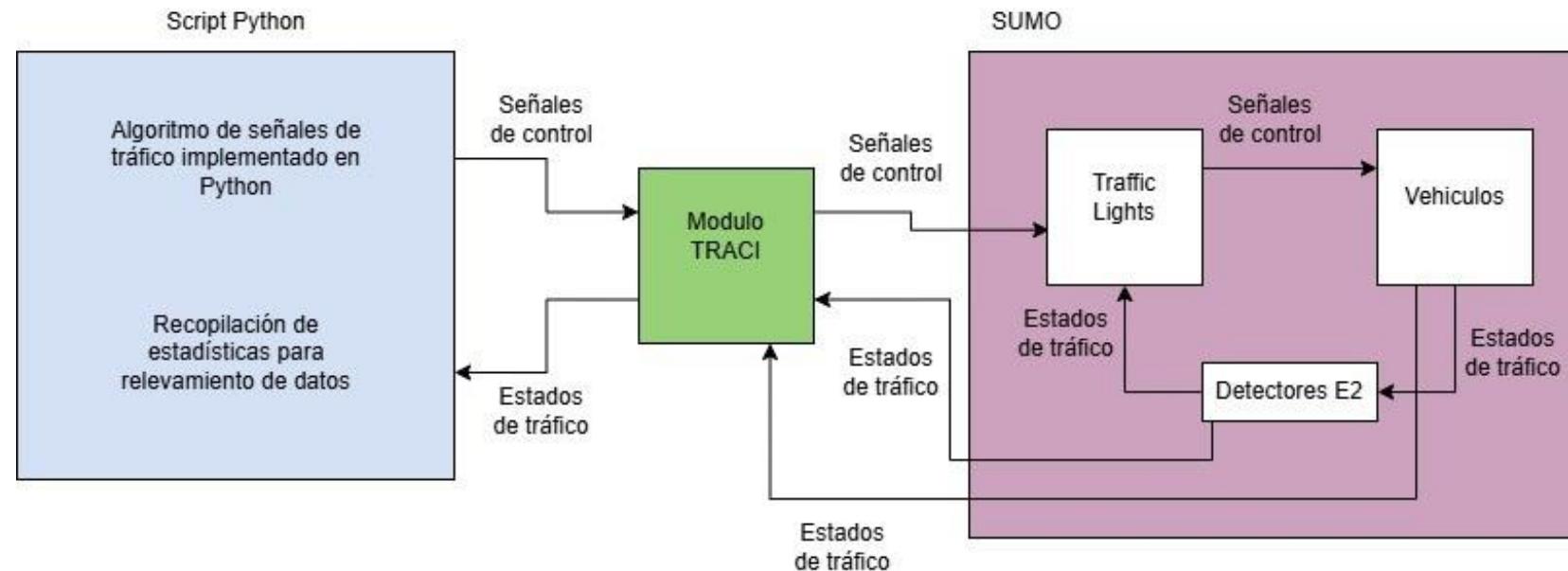
Trabajo de campo para configuración del escenario

- Contabilización de flujos de vehículos.
- Configuración de semáforos con tiempos de semáforo existentes.
- Implementación de Detectores E2 (en celeste en la imagen) que permiten detectar la presencia de vehículos.



Configuración de algoritmos en Simulación

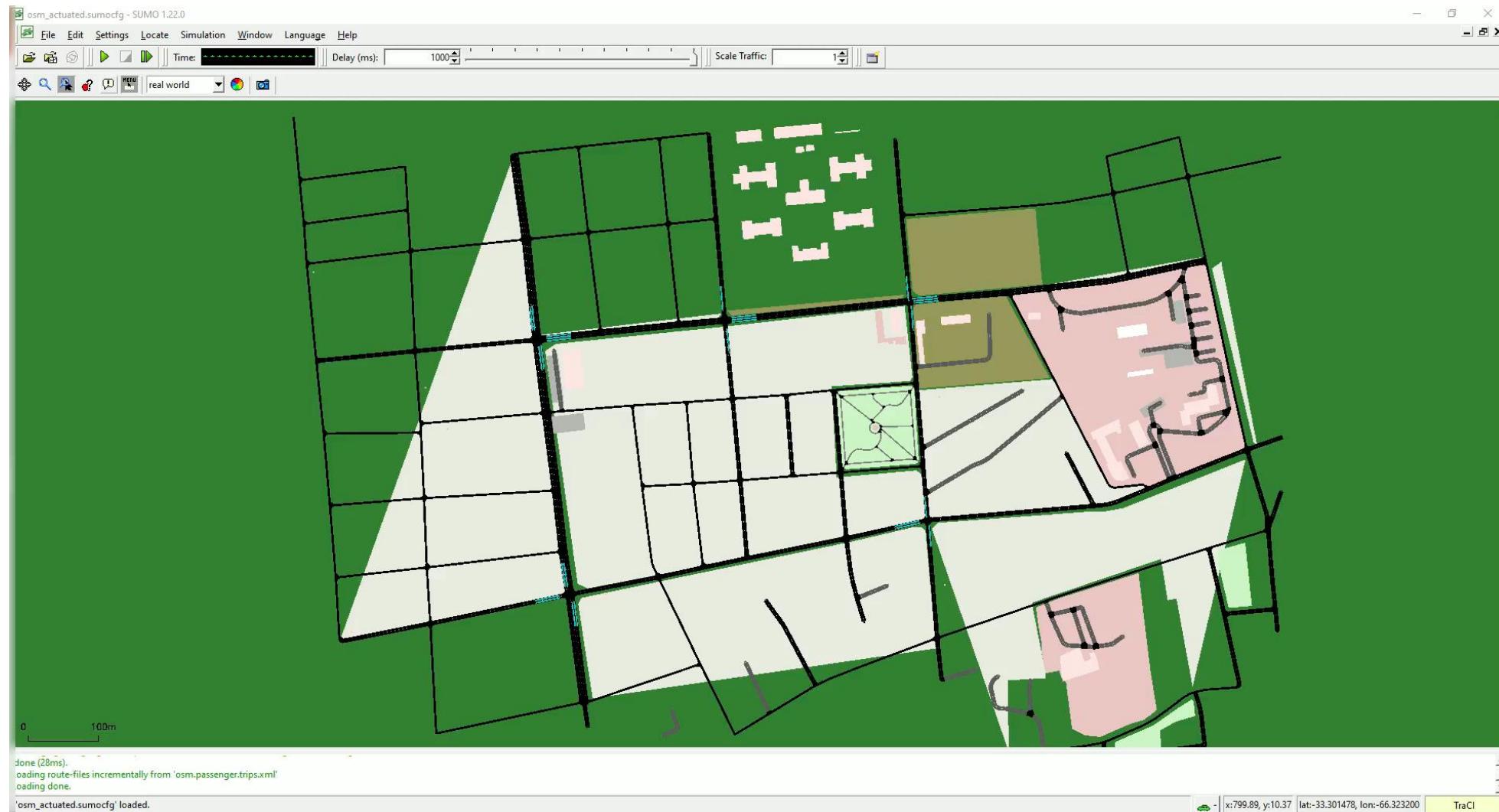
Mediante la herramienta TRACI se puede controlar los semáforos en la simulación y leer estados de tráfico.



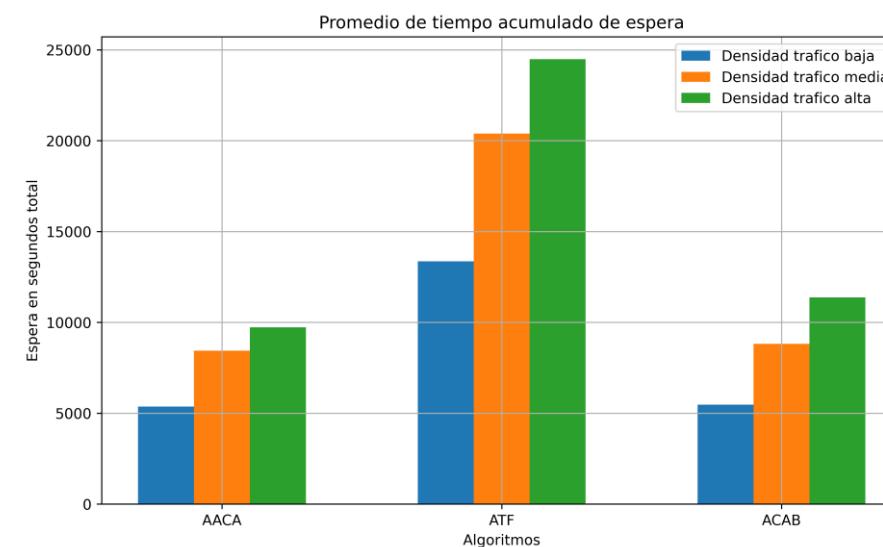
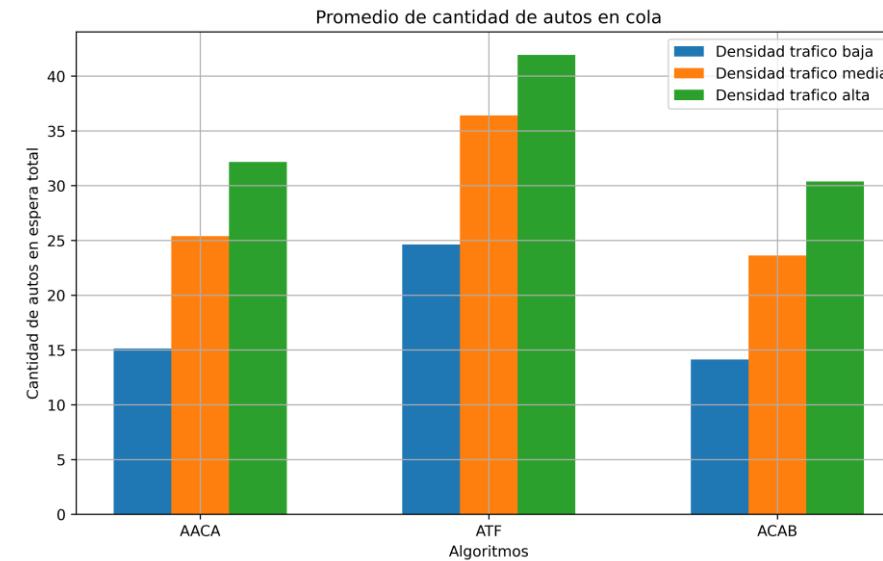
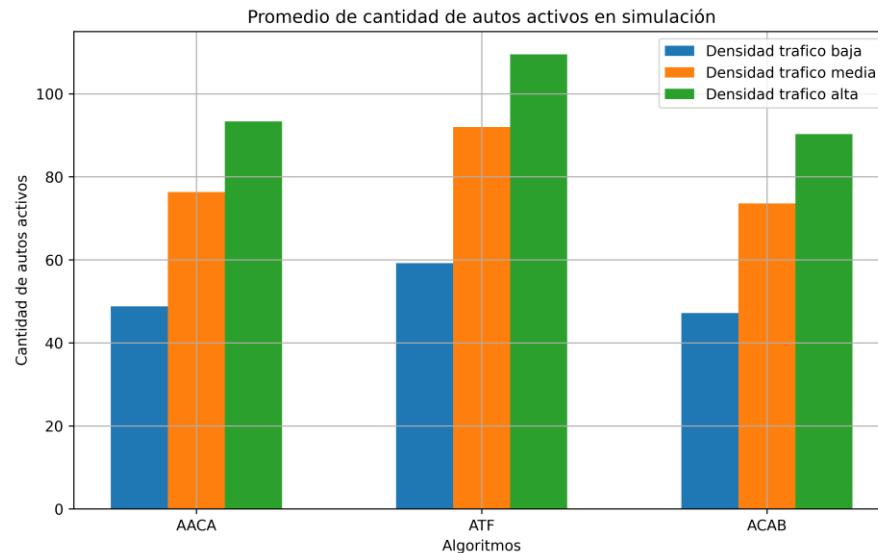
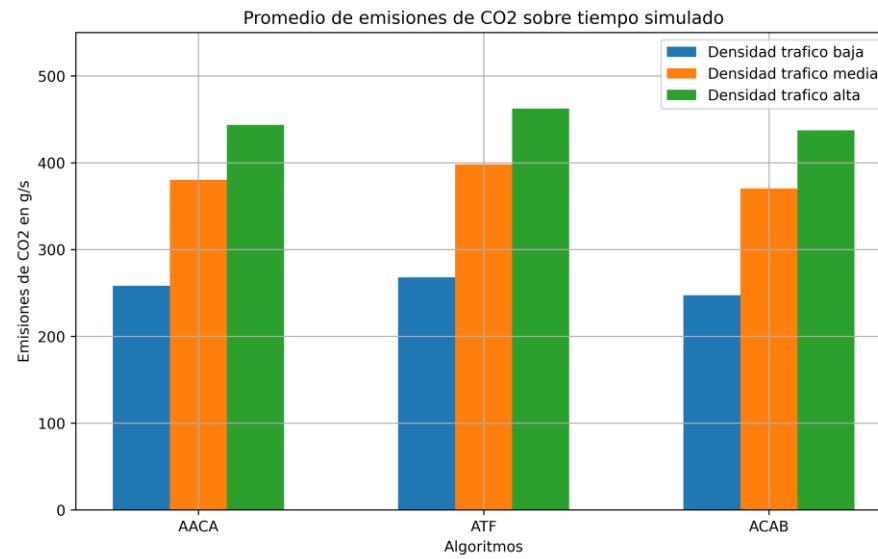
Se plantean tres algoritmos de control a evaluar:

- Algoritmo de Tiempo Fijo (ATF).
- Algoritmo Adaptativo por Cantidad de Autos (AAC).
- Algoritmo de Control Actuado por Brecha (ACAB).

Video Simulación



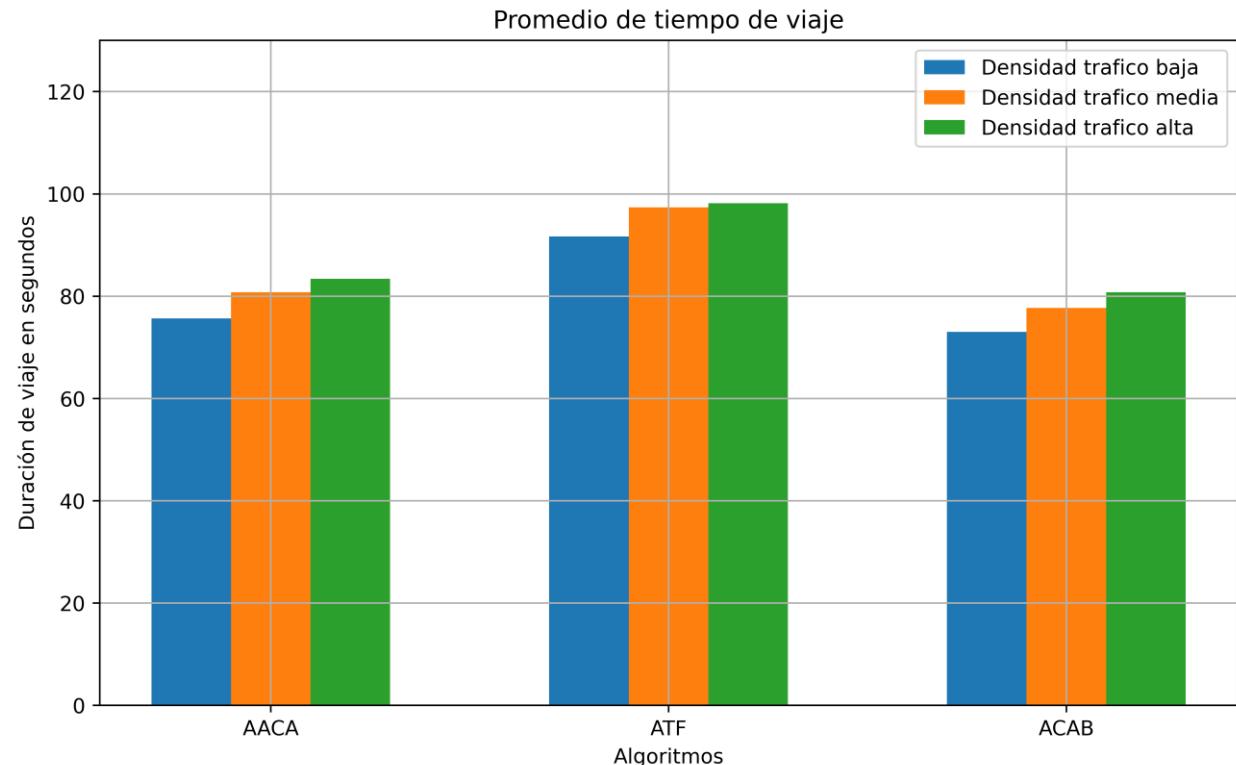
Rendimiento de algoritmos adaptativos



Rendimiento de algoritmos adaptativos

Métricas de análisis en 3 escenarios de tráfico

- Cantidad de vehículos activos (-18%).
- Tiempo promedio de viaje (-18%).
- Tiempo de espera acumulado (-58%).
- Longitud de cola promedio (-33%).
- Emisiones de CO2 por segundo (-5%).



ACAB es el algoritmo mas sencillo de implementar

Arquitectura del sistema

Implementación de un sistema de semáforos inteligente basado en detección visual.

- Sistema descentralizado y modular

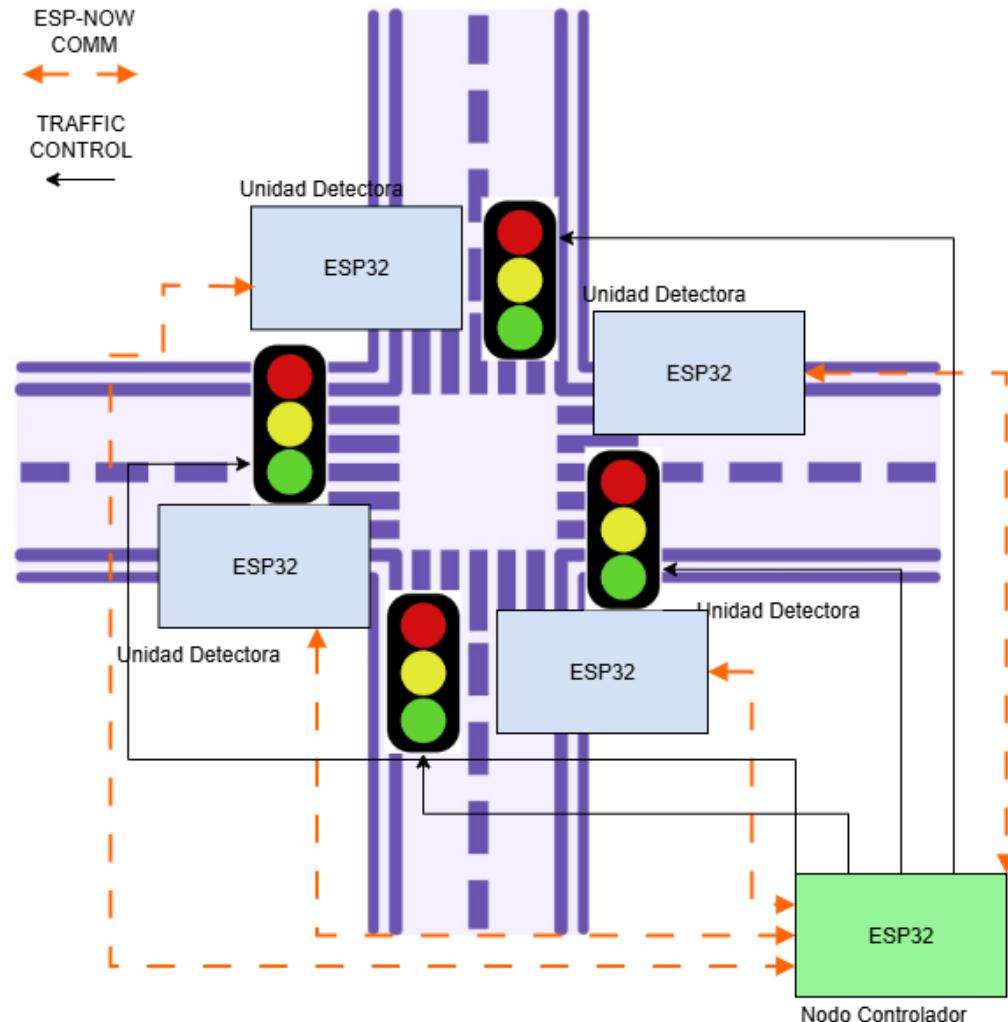
Unidad Detectora

- Hardware: ESP32-CAM
- Función: Procesamiento de imágenes en el borde, detecta presencia vehicular y brechas.

Nodo de Control

- Hardware: ESP32
- Función: Controla los semáforos teniendo en cuenta la información que recibe.

ESP-NOW para comunicación entre dispositivos.



Funcionamiento Unidad Detectora

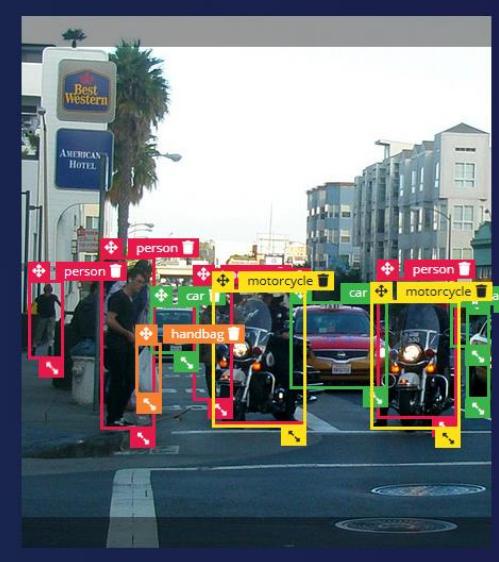
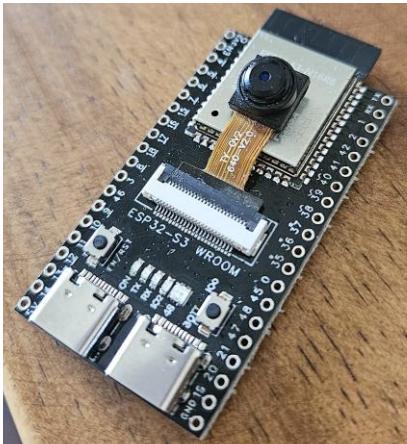
Hardware:

ESP32-CAM-S3

Microcontrolador de bajo costo

Conectividad (Wi-Fi/BT)+ Cámara

Recursos limitados (RAM/Flash)



El entrenamiento (Machine Learning (ML))

Rama de la IA que aprende de datos y toma decisiones

Aprendizaje de patrones visuales

Entrenamiento realizado con plataforma Edge Impulse

Al ejecutar el modelo de ML en el ESP32, podemos identificar si hay vehículos presentes o no.

Procesamiento: 1,125 s



Funcionamiento Nodo de Control

Hardware:

ESP32S

- Microcontrolador de bajo costo
- Conectividad (Wi-Fi/BT)



Funcionamiento:

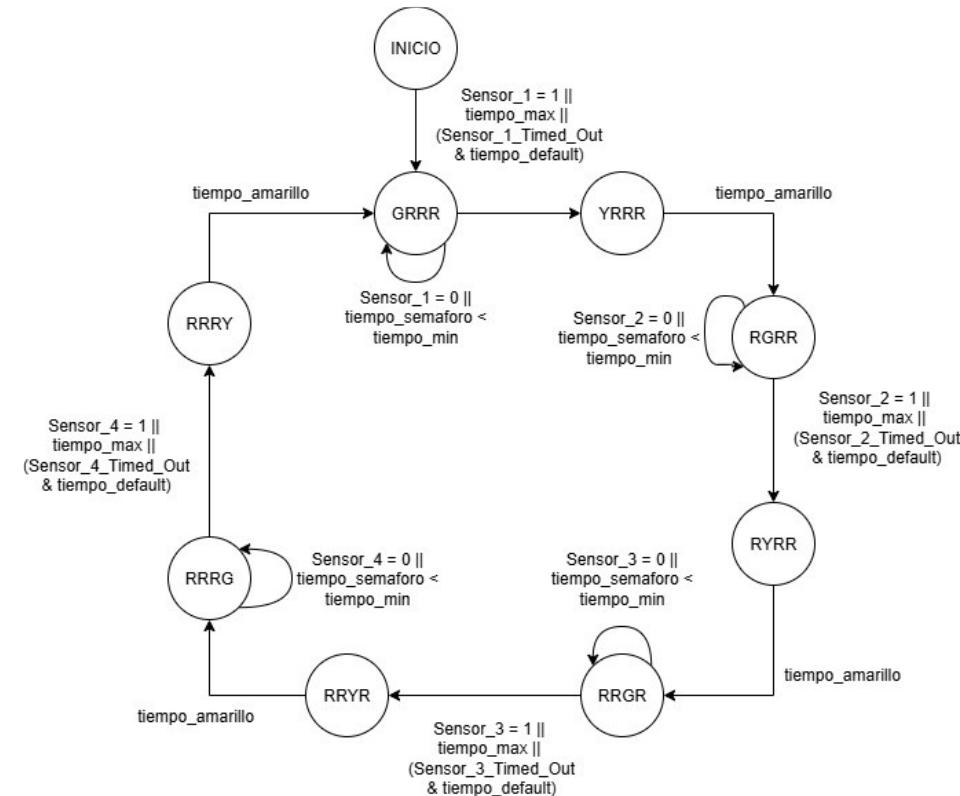
Recibe señales de Unidades Detectoras (UD) y las incluye en la lógica

Dinámica de transición:

- Tiempo mínimo: Garantiza verde mínimo.
- Detección de brecha: Si no hay vehículos por X tiempo, transición.
- Tiempo máximo: Fuerza el corte si hay flujo continuo.

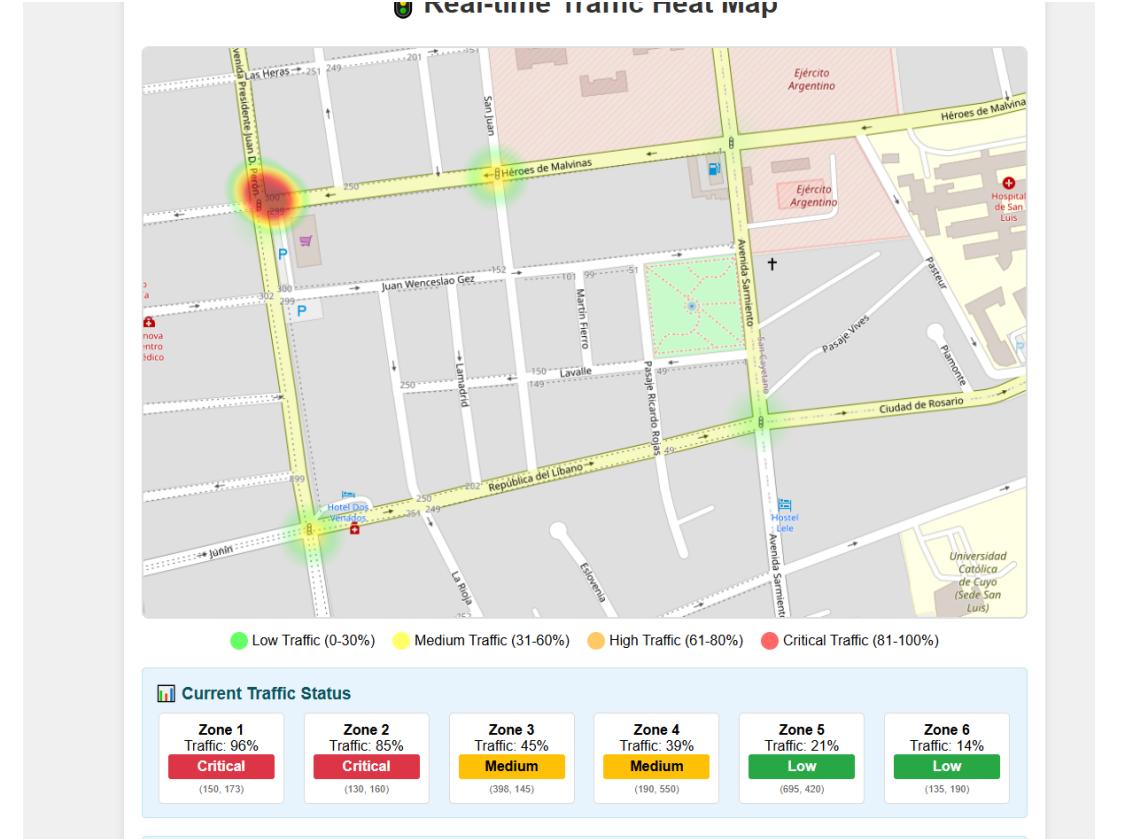
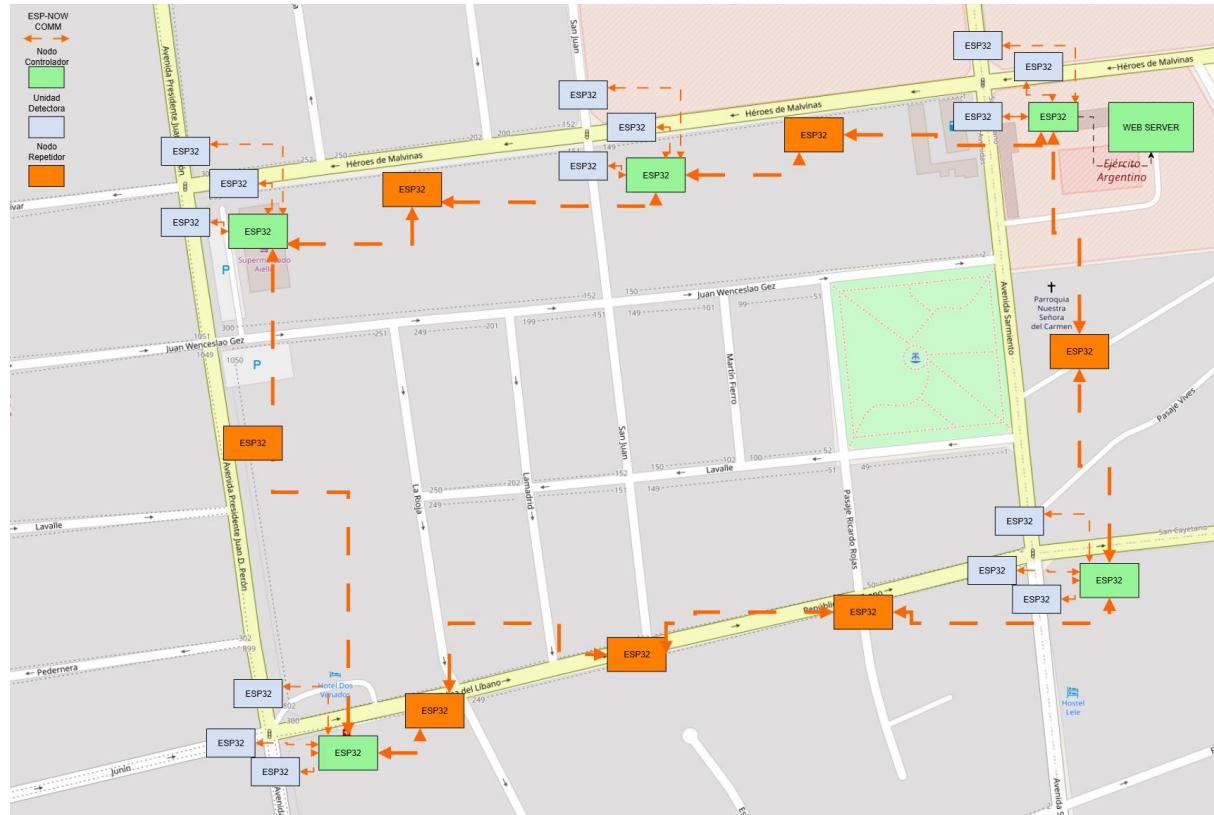
Seguridad:

- Si no se detecta UD, modo de tiempo fijo.
- Estado de emergencia.



Funcionamiento Nodo de Control

- Además, se implementa recopilación de datos y servidor web para visualización de datos de tráfico.



Evaluación del rendimiento en campo

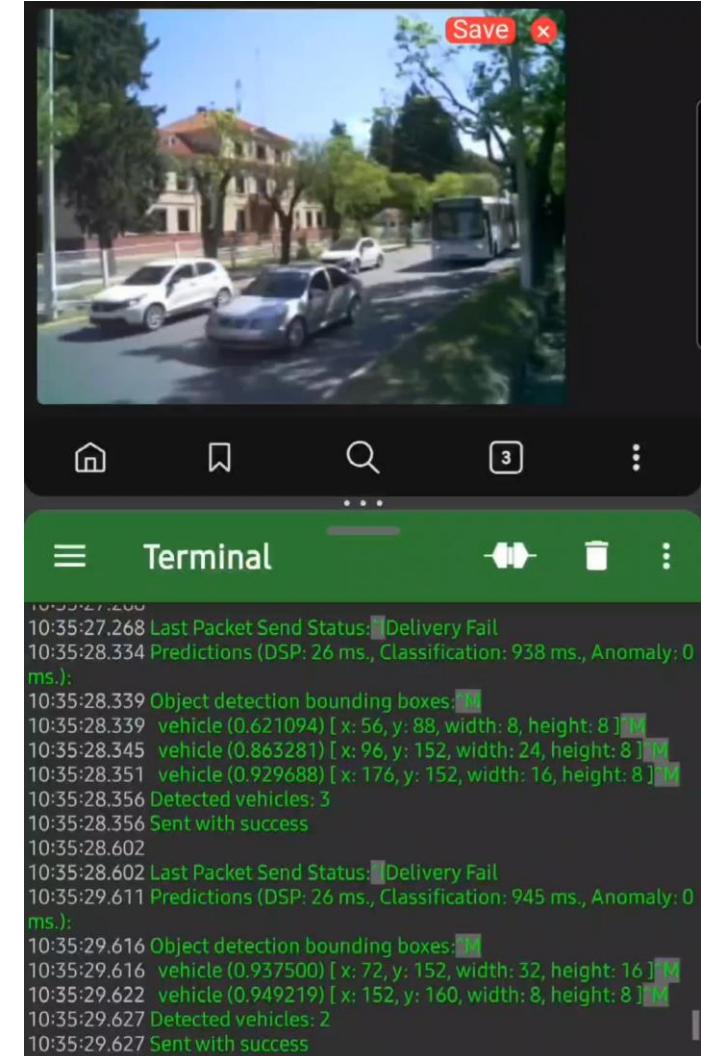
Métricas del modelo

- Alta precisión (99,14%): Casi nulos Falsos Positivos.
- Exhaustividad (79,86%): Tendencia a omitir algunos vehículos.
- Puntaje F1: 88,46%.

Matriz de confusión de conteos de video.

	Predicted: vehicles	Predicted: no vehicles
Actual: vehicles	575	145
Actual: no vehicles	5	190

Para contrarrestar la tendencia de omitir algunos vehículos, la señal de corte se envía luego de 4 detecciones consecutivas.



Simulación realista

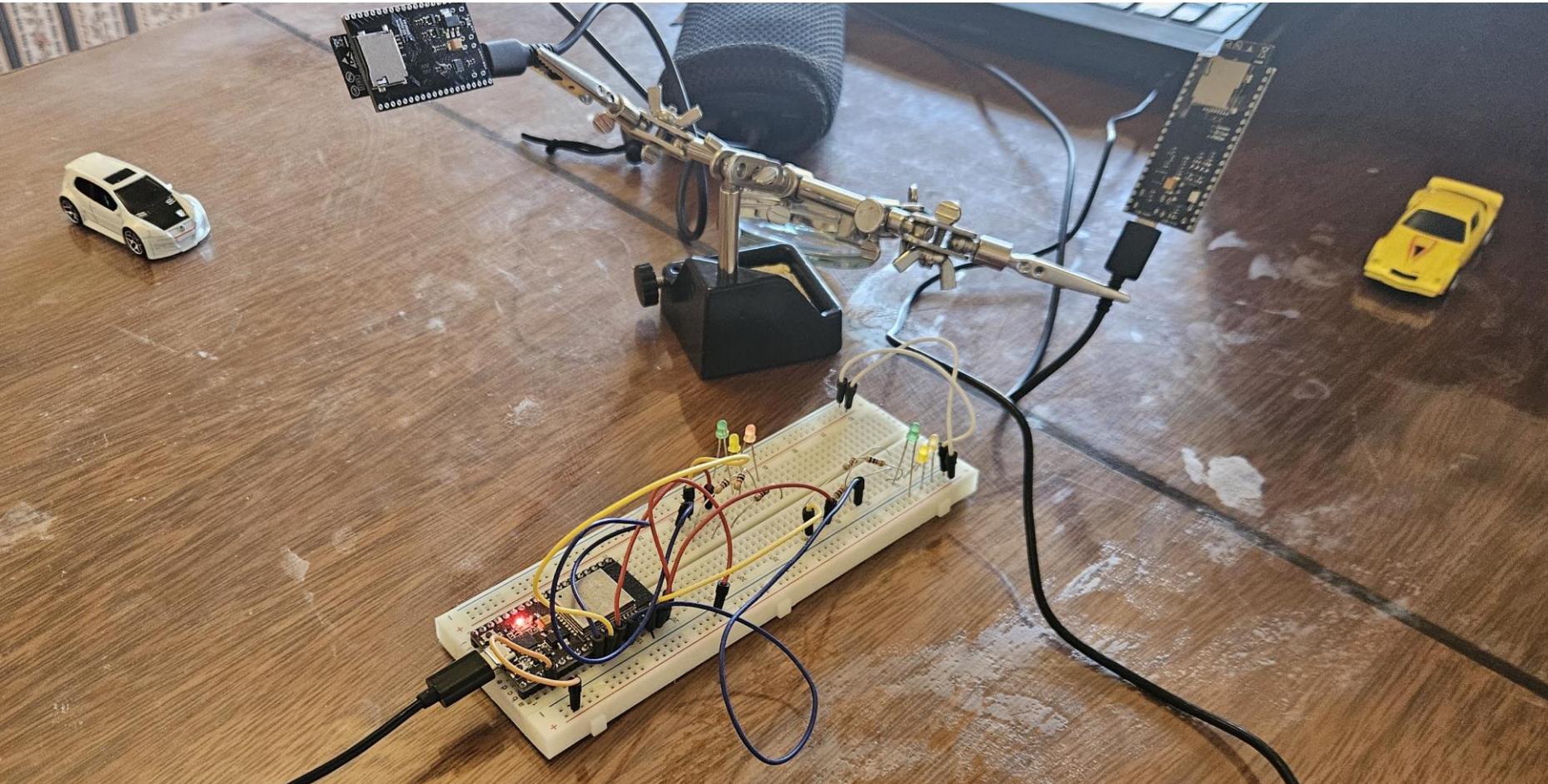
Se modificó la simulación para tener incluidas la precisión (70,7% del entrenamiento), falsos positivos (2,56%) y tiempos de detección (1125 ms).

ACAB Realista vs. ATF/ACAB por densidad.

Métrica	ATF alto	ATF medio	ATF bajo	ACAB alto	ACAB medio	ACAB bajo
Tiempo de viaje	-14,82 %	-18,76 %	-19,43 %	+3,54 %	+1,80 %	+1,11 %
Promedio CO2	-4,59 %	-6,71 %	-7,24 %	+0,87 %	+0,27 %	+0,47 %
Cantidad de autos en cola	-22,33 %	-31,81 %	-41,82 %	+7,23 %	+5,11 %	+1,40 %
Autos activos	-14,52 %	-18,73 %	-19,49 %	+3,66 %	+1,58 %	+1,01 %
Tiempo de espera	-51,46 %	-55,71 %	-61,46 %	+4,49 %	+2,38 %	-5,86 %

El algoritmo realista supera consistentemente al ATF, y solo es ligeramente peor que el algoritmo ACAB ideal.

Prototipo funcional



Limitaciones y análisis crítico

Restricciones de hardware y modelo

- El uso de ESP32 limita la complejidad del modelo (peor detección).
- Sensibilidad a condiciones adversas.
- ESP-NOW es funcional pero susceptible a interferencias y largas distancias.

Alcance de la validación

- Simulación determinista.
- Entrenamiento de ML específico.
- Sin prioridad para vehículos de emergencia o análisis de datos.

Sesgo del sistema

- Enfoque centrado en vehículos.
- No contempla peatones, ciclistas ni transporte público.
- Pérdida de ondas verde.
- Posible aumento de tiempos de espera para peatones.

Trabajo futuro



Conclusiones

1. Validación tecnológica

- Visión en el borde ejecutada en ESP32.
- Arquitectura distribuida de sistema sin utilizar internet.

2. Impacto operativo

Simulación realista validada incluyendo imperfecciones de detección.

- Reducción de tiempos de espera y emisiones de CO2.
- Mejora de la congestión de tráfico.

3. Viabilidad del sistema

- Sistema propuesto reduce costos hasta 90% vs Sistemas Comerciales.
- Alineación de las limitaciones de hardware económico mediante la aplicación de algoritmos robustos.

No hace falta supercomputación para resolver problemas complejos, solo hace falta ingeniería eficiente.

Reflexion final

- El encuentro de tecnologías emergentes y accesibles está generando una transformación en el desarrollo de ciudades inteligentes.
- El logro de este trabajo es la demostración de un modelo de innovación replicable que permite superar barreras financieras y se llama a la acción a aplicar esta metodología a otros desafíos urbanos.

Esta democratización tecnológica es un paso crucial para crear un futuro urbano más eficiente, equitativo y sostenible, a servicio de las personas.

Códigos, proyectos y videos



(a) QR del repositorio de github. Enlace: <https://github.com/juantiagoruiz/tesis-trafico-esp32>.



(b) QR del proyecto de Edge Impulse. Enlace: <https://studio.edgeimpulse.com/public/770020/live>.



(c) QR de los videos de YouTube de prototipo y evaluación de rendimiento en campo. Enlace: <https://tinyurl.com/2p8xysm5>.

¡Muchas gracias por su atención!

Tiago