



SEMÁFOROS INTELIGENTES PARA REDUCIR LAS EMISIONES VEHICULARES

SMART TRAFFIC LIGHTS TO REDUCE VEHICLE EMISSIONS

Rachid Marzoug^{1,a}, Beatriz Castillo Téllez^{2,b}, Margarita Castillo Téllez^{3,c}, Gerardo Alberto Mejía Pérez^{4,d}.

¹Centro universitario del Norte, Universidad de Guadalajara, Colotlán, Jalisco, México.

²Centro universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, Tonalá, Jalisco, México.

³Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, Campeche, México.

⁴Centro universitario de Tlaquepaque, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.

^arachid.marzoug@academicos.udg.mx

^bbeatriz.castillo@academicos.udg.mx

^cmcastill@uacam.mx

^dgerardo.mejia@udg.mx

DOI: 10.59730/rer.v12n59a2

RESUMEN

El tráfico urbano no solo afecta nuestra rutina diaria, también impacta la calidad del aire que respiramos. En este contexto, los semáforos inteligentes tecnología que utiliza inteligencia artificial y sensores en tiempo real se presentan como una solución eficaz para mejorar la movilidad y reducir la contaminación. Al optimizar los tiempos de espera en las intersecciones, estos sistemas permiten disminuir hasta un 39% las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), además de reducir un 25% los tiempos de viaje y un 40% los momentos de inactividad de los vehículos. Si bien su implementación enfrenta desafíos técnicos y económicos, su integración en las ciudades inteligentes representa una apuesta estratégica por entornos urbanos más limpios, eficientes y saludables.

Palabras clave: Semáforos inteligentes; Emisiones; Tráfico vehicular; Transporte urbano; Inteligencia artificial.

1. INTRODUCCIÓN

Optimizar los sistemas de semáforos no es solo una cuestión de movilidad, sino una estrategia clave para enfrentar los retos ambientales que enfrentan las ciudades. En los entornos urbanos, donde la congestión vehicular es parte del día a día, los autos detenidos o avanzando lentamente generan una enorme cantidad de emisiones contaminantes. Este tráfico lento e ineficiente contribuye de forma significativa al deterioro de la calidad del aire, elevando los niveles de dióxido de carbono (CO_2) y partículas finas como las PM2.5, que afectan directamente la salud humana y los ecosistemas urbanos (1,2).

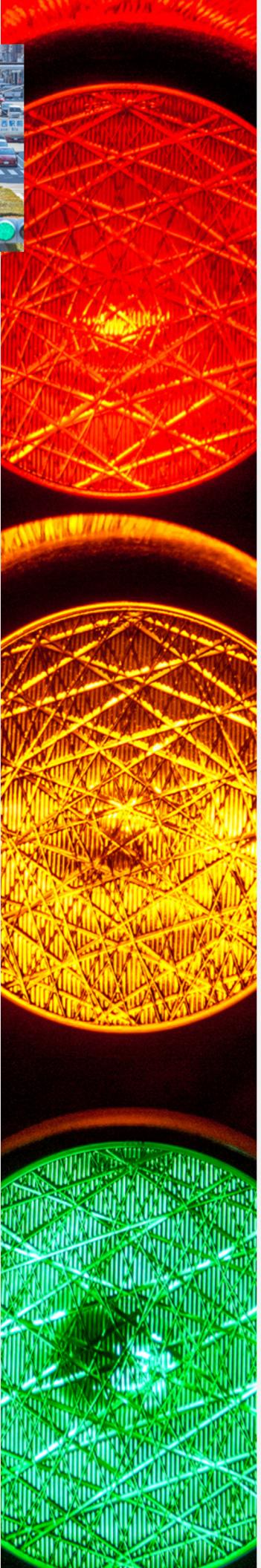
Cada vez hay más evidencia científica que muestra cómo la forma en que se gestionan los cruces viales puede hacer una gran diferencia. Ajustar la duración y coordinación de los semáforos, mediante tecnologías avanzadas, permite mejorar la fluidez del tráfico, lo que se traduce en menos tiempo con el motor encendido sin avanzar, menos paradas innecesarias y, por lo tanto, menores emisiones. Algunas simulaciones estiman que estas medidas pueden reducir hasta un 39% de las emisiones de CO_2 en zonas urbanas, dependiendo de la intensidad y distribución del tráfico (1).

Además de este impacto ambiental, la optimización de los semáforos tiene beneficios en la eficiencia del transporte: puede aumentar la velocidad promedio de los vehículos entre un 60% y 101%, reduciendo significativamente los tiempos de espera y los niveles de frustración para quienes se mueven por la ciudad. Esto se traduce en ahorros de combustible, menores costos para los usuarios y una movilidad más ágil y menos contaminante (1).

La relación entre el tráfico urbano y la contaminación del aire es clara (2). El transporte representa una fuente importante de partículas en suspensión, y se sabe que estas tienen efectos negativos sobre la salud pública, desde irritaciones respiratorias hasta enfermedades cardiovasculares crónicas. Por ello, abordar el problema desde una perspectiva multisectorial -que combine tecnología, planeación urbana y políticas públicas- resulta fundamental para construir ciudades más limpias, seguras y habitables.

La gestión del tráfico mediante soluciones tecnológicas como los semáforos inteligentes puede ser un componente esencial dentro de los planes de reducción de emisiones de muchas ciudades, especialmente aquellas con altos niveles de contaminación. La evidencia disponible muestra que estas inversiones no solo son rentables en el largo plazo, sino que permiten obtener resultados rápidos y medibles en términos de calidad del aire y salud pública.

De hecho, diversos estudios han demostrado que una menor exposición a contaminantes generados por el tránsito puede tener efectos positivos directos sobre la salud: menos casos de asma, menor incidencia de enfermedades pulmonares crónicas y una reducción del riesgo cardiovascular en la población. Incluso, estimaciones basadas en modelos del estudio Global Burden of Disease han calculado los beneficios en términos de vidas y años saludables ganados al reducir las emisiones vehiculares (2).



2. SISTEMAS DE SEMÁFOROS: DEL CONTROL VIAL A LA SOSTENIBILIDAD URBANA



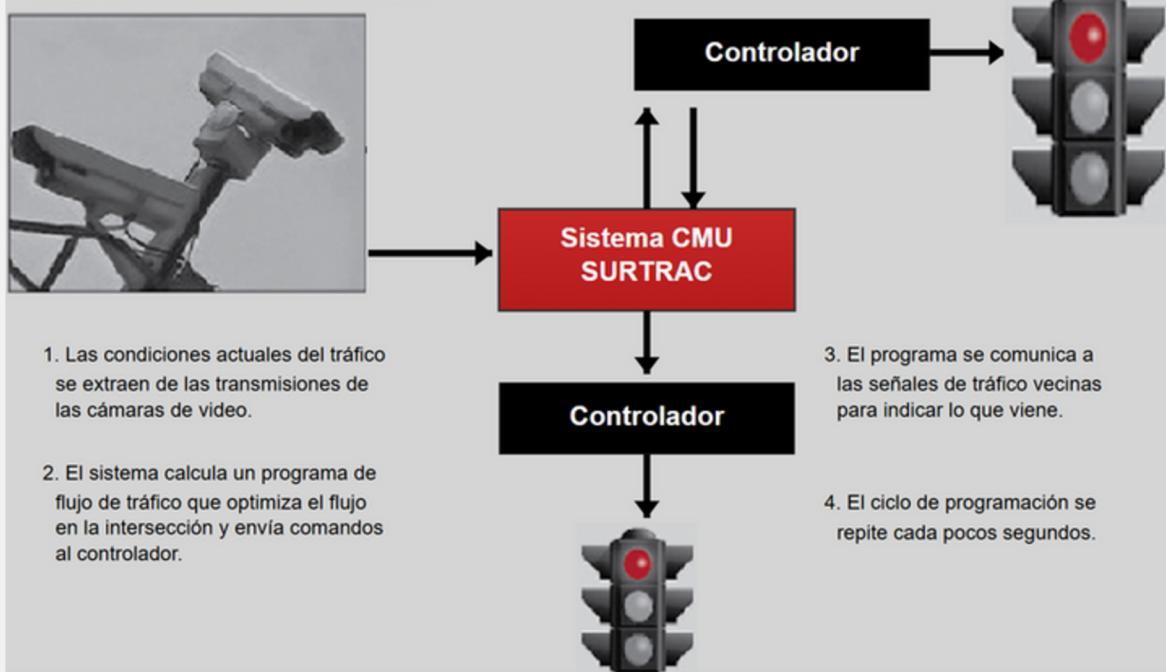
Los semáforos son elementos fundamentales para ordenar el tráfico urbano, regular el desplazamiento de vehículos y peatones y reducir accidentes. Sin embargo, cuando se diseñan y operan de manera eficiente, su función puede contribuir también a la sustentabilidad urbana. El uso de tecnologías avanzadas como inteligencia artificial, sensores y análisis de datos en tiempo real ha impulsado la transición hacia sistemas de control adaptativo capaces de responder a las condiciones cambiantes del entorno. Los semáforos inteligentes son muestra de ello: sustituyen los ciclos fijos por algoritmos que ajustan sus fases según el flujo vehicular, la presencia de peatones o la congestión en vías aledañas. Ejemplos como Surtrac, implementado en Pittsburgh, demuestran su eficacia al reducir tiempos de viaje en un 25% y la inactividad vehicular en un 40%, gracias a un enfoque descentralizado en el que cada intersección toma decisiones autónomas y coordinadas (3,4).

Este avance técnico representa un cambio de paradigma hacia una infraestructura vial dinámica y orientada a la eficiencia energética. Sus beneficios incluyen la disminución de emisiones contaminantes al evitar paradas y arranques innecesarios, una mayor seguridad vial gracias a flujos más predecibles, mejoras en el transporte público mediante la priorización de unidades, ahorros económicos por menores tiempos de tránsito y, en conjunto, una mejor calidad de vida en ciudades menos congestionadas y con aire más limpio (5,6). Su potencial se amplifica cuando se integran al ecosistema de las ciudades inteligentes, donde se conectan con plataformas que monitorean calidad del aire, clima, densidad peatonal o desempeño del transporte público. Esto permite ajustar parámetros en tiempo real ante eventos masivos, accidentes o necesidades de priorización de rutas, fortaleciendo la resiliencia urbana y promoviendo una gestión más estratégica del transporte (6).

El impacto ambiental de estos sistemas es particularmente relevante. Cada detención innecesaria en un cruce incrementa las emisiones de gases contaminantes, por lo que optimizar la operación semafórica se convierte en una estrategia directa para reducir la huella ambiental del transporte. Los sistemas de semáforos inteligentes, también conocidos por sus siglas en inglés como ITLS (*Intelligent Traffic Light Systems*) han demostrado su capacidad para disminuir el tiempo de inactividad vehicular, reduciendo con ello el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ (7,8). Simulaciones realizadas en distintos escenarios de tráfico reportan reducciones de entre 32% y 40% en emisiones de CO₂, cifras cercanas al límite teórico del 39% bajo condiciones ideales de flujo continuo (1). Además, estos resultados se mantienen incluso en entornos urbanos complejos, lo que confirma su potencial de impacto real y escalable (1).

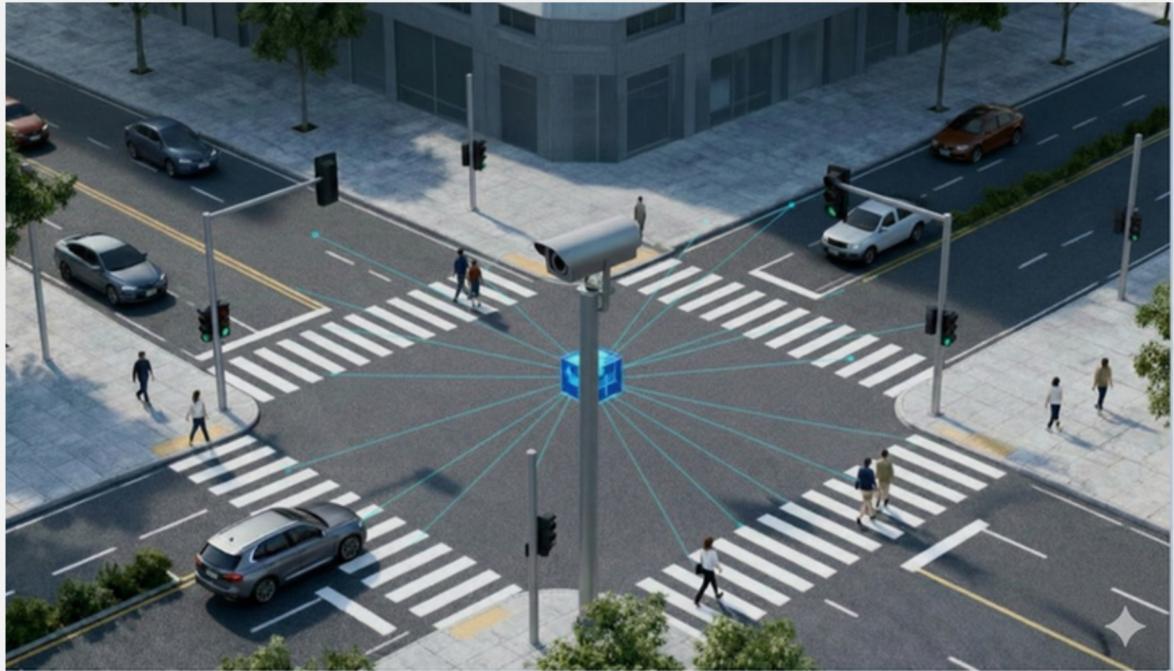
La reducción de CO₂ no es el único beneficio ambiental. Al mejorar la fluidez del tránsito, los semáforos inteligentes disminuyen también contaminantes como CO, NO_x y PM2.5, directamente vinculados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, especialmente en grupos vulnerables (7,8). Esto refuerza su contribución a la salud pública, ya que un aire más limpio reduce riesgos sanitarios y mejora el bienestar urbano. A su vez, la menor congestión conlleva menores tiempos de viaje, menor consumo de combustible y una reducción de costos para empresas, servicios logísticos y transporte público, lo que se traduce en mayor productividad y menor estrés para los usuarios (8). En conjunto, la optimización semafórica se consolida como una intervención de alto impacto que aborda simultáneamente desafíos ambientales, económicos y sociales, y cuyos beneficios pueden compensar rápidamente los costos de implementación.

Así funciona el sistema:



2. SISTEMAS DE SEMÁFOROS: DEL CONTROL VIAL A LA SOSTENIBILIDAD URBANA (cont)

Figura 1: Esquema de la funcionalidad de Surtrac (9).



3. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN: CUANDO LOS SEMÁFOROS APRENDENA PENSAR

La optimización de semáforos combina algoritmos computacionales, modelos matemáticos e inteligencia artificial para lograr un tránsito más fluido y con menores emisiones. Métodos clásicos como la programación dinámica y los modelos de contrapresión permiten calcular tiempos eficientes según el flujo vehicular, aunque su alto costo computacional dificulta su aplicación en tiempo real en redes complejas (10). A esto se suman estrategias de sincronización que coordinan series de semáforos para reducir detenciones, consumo de combustible y emisiones, especialmente en corredores principales (11).



Los avances más recientes provienen de la inteligencia artificial: permiten que los semáforos aprendan, predigan congestiones y colaboren entre sí para mejorar el flujo en tiempo real (11). No obstante, muchas de estas técnicas aún se prueban en entornos simulados, lo que evidencia una brecha entre su desarrollo teórico y su aplicación en calles reales.

Para complementar estos enfoques, se emplean modelos matemáticos y simulaciones capaces de explorar múltiples escenarios y encontrar soluciones eficientes en redes urbanas complejas (12).

En conjunto, estas herramientas buscan reducir tiempos de detención y circulación lenta, los momentos que más contaminan. Optimizar semáforos es una acción de ingeniería con impacto ambiental directo: menos emisiones, menos ruido y una movilidad más agradable y sostenible.

La optimización de los semáforos no solo es una cuestión de ajustar luces; es una tarea compleja que involucra cálculos matemáticos, programación computacional y herramientas de inteligencia artificial. El objetivo principal es claro: lograr un tránsito más fluido, con menos detenciones y, por tanto, con menos emisiones contaminantes.



4. DESAFÍOS Y LIMITACIONES: CUANDO LA TECNOLOGÍA NECESA MÁS QUE BUENA VOLUNTAD

Aunque los semáforos inteligentes ofrecen beneficios evidentes para la movilidad, la sustentabilidad y la salud pública, su implementación enfrenta obstáculos técnicos, económicos y éticos que suelen pasar desapercibidos. En primer lugar, optimizar señales en tiempo real dentro de redes urbanas densas implica manejar un número enorme de variables que crece exponencialmente con cada intersección añadida. Esto demanda capacidades de cómputo que muchas ciudades no poseen, lo que obliga a recurrir a métodos matemáticos avanzados que brindan soluciones funcionales, aunque no siempre óptimas ni adaptables a contextos locales con patrones de movilidad particulares (11).

A esta complejidad se suma la necesidad de contar con datos precisos y actualizados. Los algoritmos dependen de información en tiempo real sobre vehículos, peatones y variaciones del flujo, pero la infraestructura de sensores en muchas ciudades es limitada, fragmentada o costosa de mantener. La falta de datos confiables no solo debilita la toma de decisiones del sistema, sino que también incrementa los costos operativos al requerir mantenimiento continuo de cámaras, redes y equipos especializados (13).

El aspecto económico también constituye una barrera importante. Implementar un sistema de semáforos inteligente requiere inversiones iniciales elevadas en hardware, software, conectividad y capacitación. Aunque los beneficios a largo plazo pueden ser significativos -desde ahorro de combustible hasta reducción de emisiones y accidentes- no todas las ciudades cuentan con recursos o personal para realizar análisis de costo-beneficio completos ni acceder a fuentes de financiamiento como subvenciones o alianzas público-privadas, lo que genera desigualdades en quién puede adoptar estas tecnologías (13).

Finalmente, la recopilación masiva de datos plantea interrogantes éticos. Sensores y cámaras pueden registrar información sensible sobre los desplazamientos de las personas, por lo que es imprescindible cumplir con normas de privacidad, garantizar transparencia y aplicar técnicas de anonimización. Al mismo tiempo, la creciente conectividad abre la puerta a riesgos de ciberseguridad: un ataque a la red de semáforos podría provocar caos vial o situaciones peligrosas, de modo que proteger la integridad del sistema es esencial para mantener la confianza pública (14).

La optimización semafórica tiene un enorme potencial para transformar las ciudades, pero su éxito no depende solo de la tecnología. Requiere enfrentar de forma integral los desafíos técnicos, estructurales y éticos que acompañan esta transición para asegurar que sus beneficios sean duraderos, equitativos y verdaderamente orientados al bienestar colectivo.



5. CONCLUSIÓN

Los semáforos inteligentes no solo mejoran la gestión del tráfico, sino que representan una herramienta clave para reducir emisiones, mejorar la calidad del aire y promover ciudades más sostenibles. Su capacidad para adaptarse en tiempo real optimiza el flujo vehicular, disminuye el uso de combustible y aporta beneficios en salud pública y movilidad urbana.

Aunque su implementación exige inversión, planificación y marcos legales adecuados, estos sistemas pueden impulsar ciudades más equitativas y eficientes si se diseñan con enfoque inclusivo. Los semáforos inteligentes son un paso estratégico hacia urbes más limpias y habitables, donde cada mejora en el tránsito contribuye a un entorno más saludable y sostenible.

REFERENCIAS

1. Santos O, Ribeiro F. Using Smart Traffic Lights to Reduce CO₂ Emissions and Improve Traffic Flow at Intersections : Simulation of an Intersection in a Small Portuguese City. 2024;
2. Id SH, Asgharian M, Kelly FJ, Goel R. Potential health benefits of eliminating traffic emissions in urban areas. 2022;1–14. Available from: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0264803>
3. Smith SF, Barlow GJ, Xie X-F, Rubinstein ZB. Real - Time Adaptive Traffic Signal Control for Urban Road Networks: The East Liberty Pilot Test. 2012;
4. Smith, S. F., Barlow, G., Xie, X. F., & Rubinstein ZB. SURTRAC: Scalable Urban Traffic Control. 2013.
5. Almaliki M, Bamaqa A, Badawy M, Farrag TA, Balaha HM, Elhosseini MA. Adaptive Traffic Light Management for Mobility and Accessibility in Smart Cities. 2025;1–31.
6. Agand P, Iskrov A, Chen M. Deep Reinforcement Learning-based Intelligent Traffic Signal Controls with Optimized CO₂ emissions. arXiv Prepr arXiv. 2023;
7. Wang Z, Xu L. Carbon Dioxide Emission Reduction-Oriented Optimal Control of Traffic Signals in Mixed Traffic Flow Based on Deep Reinforcement Learning. 2023;
8. Gheorghe C, Soica A. Revolutionizing Urban Mobility: A Systematic Review of AI, IoT, and Predictive Analytics in Adaptive Traffic Control Systems for Road Networks. 2025;1–25.

9. Ken Walters. Smart Signals [Internet]. 2012. Available from: <https://www.cmu.edu/piper/news/archives/2012/october/smartsignals.html>
10. Inoue D, Yamashita H, Aihara K, Yoshida H. Traffic Signal Optimization in Large-Scale Urban Road Networks : An Adaptive-Predictive Controller Using Ising Models. IEEE Access. 2024;12(November):188739–54.
11. Review AL. Traffic Signal Optimization to Improve Sustainability : A Literature Review. 2022;
12. Tomar I, Sreedevi I, Pandey N. State-of-Art Review of Traffic Light Synchronization for Intelligent Vehicles : Current Status , Challenges , and Emerging Trends. 2022;
13. García-de-la-cruz I, Chancay- L. Semaforización Inteligente : Un Análisis a los Desafíos en la Implementación de Tecnologías y Algoritmos IoT Intelligent Traffic Signaling : An Analysis to the Challenges in the Implementation of IoT Technologies and Algorithms. 2024;36:80–96.
14. Iftikhar A, Naseer K, Shiraz M, Albahli S. Security, trust and privacy risks, responses, and solutions for high-speed smart cities networks : A systematic literature review. J King Saud Univ - Comput Inf Sci [Internet]. 2023;35(9):101788. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101788>