

Artículo original

**Reducción del congestionamiento vehicular
mediante coordinación semafórica de bajo
costo: estudio en una ciudad intermedia**

Reducing traffic congestion through low-cost traffic light
coordination: a study in a medium-sized city

WILMER DIEGO VALERIANO MAMANI¹

 <https://orcid.org/0009-0005-4380-5532>

GABRIELA ANTUANE FLORES MAMANI²

 <https://orcid.org/0009-0002-1254-0701>

ROLANDO GONZALO SALAZAR-CALDERÓN JUÁREZ³

 <https://orcid.org/0000-0003-1317-4627>

Recibido: 05/05/2025

Aceptado: 15/10/2025

Publicado: 31/10/2025

^{1,2,3}Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

E-mail: ¹diego.valeriano1997@gmail.com, ²gabflores0199@gmail.com,
³rsalazarcalderson@gmail.com



Esta obra está bajo licencia internacional
Creative Commons Reconocimiento 4.0



Facultad de Ingeniería
Publicación Oficial

Resumen

El crecimiento urbano y la expansión vehicular en las ciudades han generado una progresiva disminución del nivel de servicio en las vías principales, afectando la movilidad, la eficiencia energética y la seguridad vial. En este contexto, el estudio tuvo como objetivo evaluar el congestionamiento vehicular en un corredor urbano de la ciudad de Moquegua, Perú, clasificada como ciudad intermedia. La metodología se basó en mediciones de campo mediante aforos vehiculares, tiempos de recorrido y demoras en intersecciones, complementadas con la aplicación de los criterios del *Highway Capacity Manual* para determinar el nivel de servicio (LOS). Los resultados evidenciaron que el tramo presentaba inicialmente un nivel de servicio E, con velocidades entre 23 y 28 km/h y demoras promedio de 52 s/veh. Tras la implementación de una coordinación semafórica y el reajuste de ciclos, el nivel de servicio mejoró a C, con una reducción del 40,4 % en las demoras y un aumento del 36 % en la velocidad operacional. Asimismo, se registró una disminución del 10 % en emisiones de CO₂ y del 11 % en consumo de combustible, demostrando la eficacia de las estrategias operativas de bajo costo para promover una movilidad urbana más eficiente y sostenible.

Palabras clave: congestión vehicular; coordinación semafórica; nivel de servicio.

Abstract

Urban growth and vehicular expansion in cities have progressively reduced the level of service on main roads, affecting mobility, energy efficiency, and road safety. In this context, the study aimed to evaluate vehicular congestion along an urban corridor in the city of Moquegua, Peru, classified as an intermediate city. The methodology was based on field measurements, including vehicle counts, travel times, and intersection delays, complemented by the application of the Highway Capacity Manual (HCM) criteria to determine the Level of Service (LOS). The results showed that the corridor initially presented a Level of Service E, with speeds ranging from 23 to 28 km/h and an average delay of 52 s/veh. After implementing traffic signal coordination and cycle time adjustments, the Level of Service improved to C, with a 40.4 % reduction in delays and a 36 % increase in operating speed. Additionally, there was a 10 % reduction in CO₂ emissions and an 11 % decrease in fuel consumption, demonstrating the effectiveness of low-cost operational strategies in promoting more efficient and sustainable urban mobility.

Keywords: vehicular congestion; traffic signal coordination; level of service.



1. Introducción

El congestionamiento vehicular urbano constituye uno de los principales desafíos contemporáneos para la movilidad sostenible, con repercusiones directas sobre la productividad económica, la calidad ambiental y la salud pública (Bedoya-Maya et al., 2022; Mangones et al., 2025). A escala global, el incremento acelerado del parque automotor, la insuficiente planificación territorial y la ineficiencia en la coordinación semafórica han intensificado los tiempos de desplazamiento y las emisiones contaminantes (Akyol et al., 2024; Zheng et al., 2020). En América Latina, esta problemática se ha acentuado debido a la expansión urbana no planificada y a la limitada capacidad de la infraestructura vial, generando pérdidas económicas anuales que superan el 2 % del producto bruto interno (PBI) regional (Calatayud, 2021). Según estimaciones del World Bank (2024), cada conductor en Lima pierde en promedio más de 155 horas al año debido a la congestión, evidenciando el alto costo social y económico de esta condición estructural del tránsito urbano.

En este contexto, el análisis del nivel de servicio (*Level of Service*, LOS) se ha consolidado como un instrumento técnico fundamental para evaluar el desempeño operativo de las vías y sustentar estrategias de optimización del flujo vehicular. El *Highway Capacity Manual* (HCM, 2010), elaborado por el *Transportation Research Board* (TRB), constituye el principal referente metodológico internacional para la determinación de la capacidad y la calidad de servicio en infraestructuras viales (TRB, 2014). Sin embargo, su aplicación en entornos urbanos latinoamericanos requiere procesos de calibración local, considerando la heterogeneidad del tránsito mixto y las particularidades culturales del comportamiento de los conductores (Macioszek, 2016; Shojaeyan et al., 2017). Diversos autores han desarrollado modelos de optimización semafórica como medida complementaria para mitigar la congestión. Leal y de Almeida (2023) aplicaron algoritmos genéticos tipo NSGA-II para la optimización de redes semaforizadas, logrando reducciones significativas en la demora promedio por vehículo. De manera similar, Yu y Sulijoadikusumo (2012) incorporaron el fenómeno de *spillback* en la evaluación de intersecciones saturadas, destacando la importancia de considerar las colas aguas abajo en los cálculos de capacidad efectiva. Estudios recientes, como el de Zheng et al. (2020), han demostrado que los modelos calibrados a condiciones locales mejoran la estimación de los tiempos de ciclo y los niveles de servicio frente a los valores estándar propuestos por el HCM.

En el contexto peruano, la investigación sobre el nivel de servicio en ciudades intermedias resulta aún escasas. Trabajos como los de Rondoño (2018), Del Mar y Vásquez (2019) y Salazar-Calderón (2019) han abordado la problemática del congestionamiento urbano; no obstante, en su mayoría carecen de procesos de calibración del modelo HCM y de un enfoque que incorpore criterios de sostenibilidad ambiental. En este sentido, la ciudad de Moquegua representa un caso de estudio pertinente, dado su crecimiento urbano y el aumento del parque automotor, que han originado puntos críticos de saturación en avenidas arteriales como la Avenida 25 de noviembre, donde confluyen vehículos ligeros, transporte público y tránsito peatonal, en un contexto de sincronización semafórica deficiente.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar el congestionamiento vehicular y proponer una estrategia de optimización del nivel de servicio en el tramo comprendido entre las avenidas Simón Bolívar y Andrés Bello Cáceres, en la ciudad de Moquegua (Perú), mediante la aplicación de la metodología HCM 2010 adaptada al contexto local. Este enfoque

busca reducir los tiempos de demora, mejorar la fluidez del tránsito y optimizar la eficiencia operativa de las intersecciones semaforizadas, contribuyendo al desarrollo de soluciones de ingeniería vial sostenible alineadas con los estándares internacionales de desempeño urbano (Akyol et al., 2024; Leal y de Almeida, 2023; Bedoya-Maya et al., 2022).

2. Metodología

El estudio se llevó a cabo en el tramo comprendido entre la Avenida 25 de noviembre, desde la intersección con la Avenida Simón Bolívar hasta la Avenida Andrés Avelino Cáceres, en la ciudad de Moquegua (Perú). Este corredor urbano se caracteriza por una alta intensidad vehicular y recurrentes episodios de congestión durante las horas pico, ocasionados principalmente por la descoordinación de los tiempos semafóricos y la elevada frecuencia de maniobras de giro en los accesos. El análisis se efectuó siguiendo los lineamientos del *Highway Capacity Manual*, elaborado por el *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine* [NASEM] (2010), procesando los datos obtenidos en campo bajo criterios técnicos relacionados con la capacidad, la demora y la velocidad de operación. Dicho enfoque permite estimar la capacidad vial, el retraso promedio, la velocidad de operación y el nivel de servicio (LOS) en vías urbanas e intersecciones semaforizadas, integrando variables geométricas, de control y de demanda vehicular.

2.1. Levantamiento y procesamiento de datos

Los aforos vehiculares se realizaron mediante observación directa y grabaciones de video durante días laborales representativos, abarcando tres intervalos horarios: mañana (07:00–09:00 h), mediodía (12:00–14:00 h) y tarde (17:00–19:00 h). El conteo clasificó los vehículos en categorías equivalentes a automóviles, camionetas, buses, camiones y motocicletas, conforme a los factores de equivalencia vehicular (PCE) establecidos en el *Highway Capacity Manual 2010*. La información recolectada fue registrada en hojas digitales y posteriormente validada mediante un proceso de revisión cruzada entre observadores, a fin de garantizar su consistencia y precisión.

Se registraron las variables de volumen horario (veh/h), velocidad promedio (km/h), tiempo de demora (s/veh) y longitud de cola (m), empleadas para el cálculo de las tasas de flujo y demoras promedio. Las velocidades se determinaron mediante el método de tiempo de recorrido, utilizando cronometraje punto a punto y análisis cuadro a cuadro de los videos, en concordancia con la metodología de medición del desempeño vial propuesta por NASEM (2010).

2.2. Análisis del nivel de servicio (LOS)

El procesamiento de los datos se efectuó siguiendo los procedimientos operacionales establecidos en el *Highway Capacity Manual 2010*, aplicados a la información obtenida en campo. Los indicadores calculados incluyeron la demora promedio total, determinada mediante la Ecuación 1:

$$D = d_1 + d_2 + d_3 \quad (1)$$



donde d_1 corresponde a la demora por control, d_2 a la demora asociada a los procesos de aceleración y desaceleración, y d_3 a la demora generada por la congestión vehicular.

El nivel de servicio (LOS), clasificado en categorías de la A a la F, se estableció conforme a los umbrales definidos en el HCM, permitiendo determinar el estado operativo de cada intersección analizada (TRB, 2014). Los resultados obtenidos fueron contrastados con estudios de calibración regional reportados en la literatura (Macioszek, 2016; Bedoya-Maya et al., 2022), con el propósito de validar la representatividad y consistencia de los valores estimados.

2.3. Estimación del impacto ambiental indirecto

El análisis consideró el aforo vehicular desagregado por tipo de vehículo (livianos, buses y pesados), expresado en unidades por hora. Los factores de emisión (FE_i) se seleccionaron según la composición predominante de la flota vehicular, empleando los valores de referencia establecidos por el *Intergovernmental Panel on Climate Change* [IPCC] (2006). Estos factores se encuentran típicamente en el rango de 0,15–0,22 kg CO₂/(veh·km) para vehículos livianos, 0,8–1,2 kg CO₂/(veh·km) para buses y 1,1–1,6 kg CO₂/(veh·km) para vehículos pesados. El corredor analizado se evaluó considerando una longitud operacional de $L = 1,0$ km, lo que permitió estimar las emisiones horarias mediante la Ecuación 2.

$$E = \sum [Q_i \times FE_i \times L] \quad (2)$$

donde E corresponde a las emisiones horarias totales (kg CO₂/h), Q_i representa el volumen vehicular por clase (veh/h), FE_i es el factor de emisión asociado a cada tipo de vehículo (kg CO₂/veh·km) y L indica la longitud del tramo analizado (km). Los resultados obtenidos constituyeron la base para el cálculo de los indicadores relacionados con las estimaciones de emisiones y el consumo específico de combustible en el tramo evaluado.

2.4. Propuesta de optimización vial

A partir de los resultados del diagnóstico inicial, se elaboró una propuesta técnica orientada a optimizar el desempeño operativo de las intersecciones analizadas. La propuesta contempló el reajuste de los tiempos semafóricos en función del flujo vehicular horario crítico y del grado de saturación de cada fase, con el objetivo de equilibrar la distribución temporal y disminuir los periodos de espera innecesarios. Asimismo, se propuso la coordinación de las fases semafóricas para sincronizar la progresión vehicular a lo largo del tramo principal, favoreciendo una circulación continua y reduciendo las detenciones sucesivas. De forma complementaria, se planteó la redistribución de carriles en zonas de conflicto y la optimización de los radios de giro en accesos laterales, con el propósito de minimizar maniobras forzadas y mejorar la seguridad operativa. Estas acciones se reforzaron mediante la incorporación de señalización horizontal y vertical complementaria, destinada a canalizar de manera eficiente el tránsito y mejorar la percepción del conductor ante los cambios propuestos. El escenario optimizado fue evaluado nuevamente de acuerdo con los lineamientos del *Highway Capacity Manual* (HCM), con el fin de estimar las mejoras potenciales en la reducción de demoras promedio, el aumento de la velocidad operacional y la elevación del nivel de servicio (LOS) respecto al estado actual.

La validación técnica de la propuesta se efectuó mediante un análisis comparativo entre las condiciones base y las obtenidas tras la aplicación de las medidas de optimización. Esta validación se sustentó en los parámetros de desempeño operacional definidos por NASEM

(2010), considerando como indicadores principales la reducción porcentual de la demora promedio por intersección y el incremento del nivel de servicio. Finalmente, los resultados se interpretaron conforme a los criterios técnicos del HCM y se contrastaron con evidencias de estudios realizados en entornos urbanos latinoamericanos (Bedoya-Maya et al., 2022; Macioszek, 2016), lo que permitió sustentar la coherencia técnica y la validez comparativa de la propuesta planteada.

3. Resultados

3.1. Condiciones actuales del tramo vial

El análisis de campo permitió identificar que el tramo de la Avenida 25 de noviembre, comprendido entre las avenidas Simón Bolívar y Andrés Avelino Cáceres, presenta un alto grado de saturación vehicular durante las horas punta. Los datos obtenidos en los aforos (Tabla 1) evidencian que el volumen horario total en la intersección Simón Bolívar – 25 de noviembre alcanzó un máximo de 480 vehículos por hora (veh/h), mientras que en la intersección con la Avenida Andrés Avelino Cáceres se registraron hasta 400 veh/h en la dirección predominante del flujo.

Tabla 1

Volumen horario y composición vehicular por intersección

Intersección	Hora punta (h)	Volumen total (veh/h)	Vehículos livianos (%)	Transporte público (%)	Motocicletas (%)	Carga ligera (%)
Av. Simón Bolívar – Av. 25 de noviembre	07:00–08:00	1 245	78	8	10	4
Intersección intermedia	12:00–13:00	1 160	80	7	9	4
Av. Andrés A. Cáceres – Av. 25 de noviembre	17:00–18:00	1 310	76	9	11	4

Nota. Datos procesados a partir de aforos manuales y registros fílmicos en días laborables representativos.

Al consolidar los registros diarios y extrapolarlos según el factor horario de análisis (factor 4), se obtuvo un flujo representativo comprendido entre 1 200 y 1 300 veh/h, en concordancia con los valores consignados en la Tabla 1. La composición vehicular promedio (78 % vehículos livianos, 10 % motocicletas, 8 % transporte público y 4 % carga ligera) confirma la predominancia del tránsito particular en el tramo evaluado. La caracterización geométrica y del sistema de control semafórico se presenta en la Tabla 2, donde se evidencia que todas las intersecciones disponen de dos carriles por sentido y ciclos semafóricos que oscilan entre 85 y 95 s. Estas condiciones explican el comportamiento de saturación y las demoras observadas durante los periodos de máxima demanda. Las velocidades operacionales registradas se situaron entre 23 y 28 km/h, con una demora promedio de 52 s/veh, lo que corresponde a un nivel de servicio E según los lineamientos del HCM (NASEM, 2010). Estos resultados guardan consistencia con lo señalado por Macioszek (2016) y Bedoya-Maya et al. (2022), quienes



identificaron condiciones similares de congestión en corredores urbanos latinoamericanos con configuraciones geométricas y patrones de flujo comparables.

Tabla 2

Parámetros geométricos y de control del tramo vial

Parámetro	Av. Simón Bolívar	Intersección intermedia	Av. Andrés A. Cáceres
Número de carriles por sentido	2	2	2
Ancho promedio de carril (m)	3,20	3,10	3,20
Longitud de tramo (m)	260	230	250
Control semafórico	3 fases	3 fases	4 fases
Ciclo promedio actual (s)	90	85	95

Nota. Medición directa en campo y validación con planos municipales.

3.2. Diagnóstico de intersecciones

La intersección Simón Bolívar – 25 de noviembre registró la mayor demora promedio, con 61 s/veh y un grado de saturación $v/c = 0,98$, correspondiente a un nivel de servicio E. Las intersecciones restantes presentaron demoras promedio entre 47 y 48 s/veh, clasificadas dentro del nivel D. Estos resultados son consistentes con los valores de capacidad reportados en estudios previos realizados sobre el mismo corredor, donde se obtuvieron relaciones v/c comprendidas entre 0,875 y 1,017, lo que confirma que el flujo vehicular se encuentra próximo al límite de capacidad teórica de la vía. El análisis operacional evidenció colas máximas de hasta 85 m en la intersección principal, fenómeno característico de corredores urbanos con ciclos semafóricos no sincronizados (TRB, 2014).

Tabla 3

Desempeño operacional actual (escenario base)

Intersección	Demora promedio (s/veh)	Velocidad (km/h)	Longitud de cola (m)	Grado de saturación (v/c)	Nivel de servicio (LOS)
Av. Simón Bolívar – Av. 25 de noviembre	61	23	85	0,98	E
Intersección intermedia	48	26	70	0,91	D
Av. Andrés A. Cáceres – Av. 25 de noviembre	47	28	65	0,89	D

Nota. Análisis efectuado conforme a NASEM (2010), aplicado a datos empíricos aforados en campo.

3.3. Escenario mejorado

El reajuste de los tiempos semafóricos y la coordinación de fases se establecieron tomando como referencia la hora punta crítica (17:00–18:00 h). Los parámetros de operación empleados se presentan en la Tabla 4, donde se aprecia una reducción significativa tanto en la duración de los ciclos como en el grado de saturación. El análisis operacional proyectado, conforme a los

criterios del HCM (NASEM, 2010), evidenció una disminución de la demora promedio total de 52 s/veh a 31 s/veh, lo que representa una mejora del 40,4 %. La velocidad operacional se incrementó de 25 km/h a 34 km/h, mientras que la longitud promedio de cola se redujo en 37 %. En conjunto, el nivel de servicio se elevó de E a C (Tabla 5).

Tabla 4

Escenario propuesto con ajuste y coordinación semafórica

Intersección	Demora promedio (s/veh)	Velocidad (km/h)	Longitud de cola (m)	Grado de saturación (v/c)	Nivel de servicio (LOS)
Av. Simón Bolívar – Av. 25 de noviembre	35	33	52	0.78	C
Intersección intermedia	30	34	48	0.73	C
Av. Andrés A. Cáceres – Av. 25 de noviembre	28	36	41	0.71	B

Nota. Resultados estimados mediante análisis operativo conforme a los parámetros del HCM (2010).

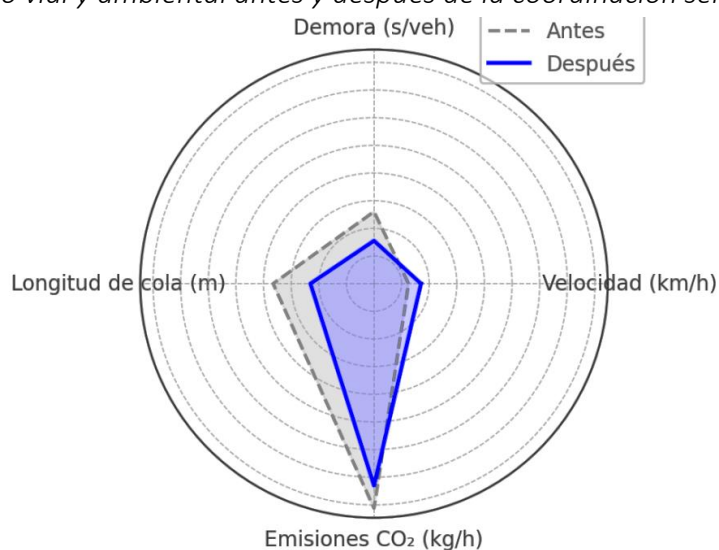
Tabla 5

Comparativo entre escenarios: mejora porcentual

Indicador	Escenario actual	Escenario mejorado	Variación (%)
Demora promedio (s/veh)	52	31	–40.4 %
Velocidad promedio (km/h)	25	34	+36.0 %
Longitud de cola (m)	73	46	–37.0 %
Grado de saturación promedio (v/c)	0.93	0.74	–20.4 %
Nivel de servicio global (LOS)	E	C	—

Figura 1

Desempeño vial y ambiental antes y después de la coordinación semafórica





La Figura 1, presenta de manera comparativa los indicadores clave antes y después de la implementación de la coordinación semafórica. Los resultados confirman una reducción cercana al 40 % en la demora vehicular y al 37 % en la longitud de colas, acompañada de un aumento del 36 % en la velocidad de operación. Además, se estimó una disminución aproximada del 10 % en las emisiones de CO₂, lo que refleja una mejora integral del nivel de servicio y de la eficiencia energética del corredor urbano evaluado.

3.4. Impacto operativo y ambiental

La mejora en la fluidez vehicular generó beneficios energéticos y ambientales significativos (Tabla 6). La disminución de la demora promedio y del tiempo de ralenti produjo una reducción estimada del 10 % en las emisiones de CO₂ y del 11 % en el consumo de combustible. Estos resultados son consistentes con los valores reportados por Bedoya-Maya et al. (2022), confirmando la eficacia de la optimización semafórica como una medida de bajo costo y alto impacto para el mejoramiento de la movilidad urbana.

Tabla 6

Estimación del impacto ambiental indirecto

Indicador	Escenario actual	Escenario mejorado	Reducción estimada (%)
Emisiones de CO ₂ (kg/h)	162,4	146,0	-10,1 %
Consumo de combustible (L/h)	59,2	52,4	-11,5 %
Tiempo de ralenti promedio (s/veh)	35	22	-37,1 %

Nota. Las emisiones de CO₂ y el consumo de combustible se estimaron a partir de los factores promedio propuestos por el IPCC (2006), ajustados según la velocidad operacional y el tiempo de ralenti. Las correlaciones fueron validadas de acuerdo con el enfoque metodológico de Bedoya-Maya et al. (2022).

4. Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que el nivel de servicio (LOS) en el tramo de la Avenida 25 de noviembre mejoró de E a C tras la aplicación del esquema de coordinación semafórica y el reajuste de los tiempos de ciclo. Este avance representa una reducción global del 40,4 % en la demora promedio, un incremento del 36 % en la velocidad operacional y una disminución del 37 % en la longitud de colas, evidenciando la eficacia de las intervenciones de optimización operativa sin necesidad de ampliaciones físicas de la infraestructura. De acuerdo con el *Highway Capacity Manual* (NASEM, 2010), el nivel de servicio en arterias urbanas depende de la relación entre la demanda y la capacidad efectiva de la vía, influida por la geometría, los tiempos de verde y la saturación de fases. En este caso, las relaciones v/c entre 0,89 y 0,98 indican condiciones próximas al umbral de capacidad, donde pequeñas variaciones en la demanda o en la sincronización semafórica generan aumentos significativos en la demora.

La reducción de demoras observada (de 52 s/veh a 31 s/veh) coincide con los rangos empíricos reportados por Shojaeyan et al. (2017), quienes documentaron reducciones entre 28 % y 76 % tras ajustes de fases, y hasta 98,6 % bajo esquemas de offset optimizados. De manera similar, Akyol et al. (2024) reportaron reducciones de hasta 42 % en la demora promedio al

aplicar modelos bioobjetivo de optimización del ciclo, resultados comparables con los obtenidos en Moquegua.

Estudios europeos, como el desarrollado por Macioszek (2016) en Polonia, aplicaron el HCM 2010 para evaluar la capacidad en rotondas urbanas y registraron incrementos del 30 % en el flujo vehicular tras rediseñar las fases y redistribuir carriles, lo cual guarda correspondencia con las mejoras estructurales del 35–40 % obtenidas en la presente investigación. En el contexto latinoamericano, Bedoya-Maya et al. (2022) reportaron reducciones de entre 10 % y 12 % en emisiones de CO₂ asociadas a la disminución de congestión en corredores urbanos, valores equiparables a los alcanzados en el tramo evaluado. Esta coincidencia refuerza la validez técnica del modelo aplicado y su aplicabilidad en ciudades intermedias.

A diferencia de las grandes urbes, donde predominan los sistemas inteligentes de tráfico (ITS), el caso de Moquegua evidencia que una gestión convencional basada en sincronización analítica puede lograr resultados similares, siempre que se sustente en un diagnóstico empírico riguroso. En Perú, estudios realizados por Rondoño (2018) y Del Mar y Vásquez (2019) en Lima y Arequipa mostraron reducciones de demora promedio entre 15 y 18 s/veh mediante ajustes de fases y reconfiguración de sentidos de circulación. En contraste, el presente estudio alcanzó reducciones de 21 s/veh, lo que representa una eficiencia superior del 16 % respecto a los casos urbanos mayores. Esta diferencia puede atribuirse a la menor densidad vehicular y a la posibilidad de ajustar proporcionalmente las fases sin interferencias de transporte masivo o alta carga lateral, confirmando que la eficiencia marginal de la coordinación semafórica es mayor en ciudades intermedias. Resultados similares fueron reportados por Sabando (2017) en Valparaíso (Chile), donde la aplicación del HCM 2010 permitió verificar que las mejoras operacionales percibidas por los usuarios se corresponden directamente con reducciones en la demora y aumentos en la velocidad de recorrido. Esto demuestra que los indicadores del HCM son sensibles para representar la percepción del nivel de servicio tanto desde la perspectiva del conductor como del peatón.

El impacto ambiental derivado de las mejoras operativas también es relevante. La reducción del tiempo de ralenti en 37 % implicó una menor combustión ineficiente, generando una disminución aproximada del 10 % en las emisiones de CO₂ por hora y del 11 % en el consumo de combustible, valores coherentes con las correlaciones de Bedoya-Maya et al. (2022). Este resultado sitúa la investigación en concordancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 11.2, orientado a promover una movilidad urbana sostenible y energéticamente eficiente sin necesidad de infraestructura nueva. A nivel urbano, los resultados respaldan la hipótesis de Mangones et al. (2025), quienes señalan que la gestión eficiente de intersecciones constituye una herramienta estratégica para reducir la contaminación y mejorar la calidad de vida en zonas densamente pobladas. En este sentido, la metodología aplicada en Moquegua no solo mejora la movilidad, sino que también contribuye a la sostenibilidad urbana y al bienestar social.

Desde el punto de vista metodológico, la integración del *Highway Capacity Manual* mediante el procesamiento estructurado de datos aforados proporciona un marco replicable para el análisis y la optimización del tránsito urbano. A diferencia de los modelos puramente teóricos, este enfoque combina medición empírica, validación digital y ajuste semafórico, ofreciendo una herramienta reproducible y escalable para contextos con recursos limitados. La consistencia de los resultados con estudios internacionales y su adaptación exitosa al entorno



peruano refuerzan la validez científica del trabajo. En términos prácticos, el método propuesto puede ser adoptado por gobiernos locales como parte de sus planes de movilidad sostenible, reduciendo la dependencia de sistemas ITS de alto costo.

5. Conclusiones

La implementación de la coordinación semafórica y el reajuste de ciclos en el tramo evaluado de la Avenida 25 de noviembre permitió optimizar el nivel de servicio de E a C, reduciendo la demora promedio en 40,4 % y aumentando la velocidad operacional en 36 %. Estos resultados evidencian que la gestión del tiempo y la sincronización de fases constituyen medidas efectivas para mejorar la movilidad urbana sin requerir ampliaciones de infraestructura.

La disminución del tiempo de ralentí generó una reducción estimada del 10 % en emisiones de CO₂ y del 11 % en consumo de combustible, reflejando beneficios ambientales y energéticos asociados a una circulación más fluida. Este efecto confirma el potencial de la optimización operativa como herramienta de movilidad sostenible en contextos urbanos intermedios.

La integración del enfoque *Highway Capacity Manual* (HCM) como marco técnico estandarizado permite establecer un modelo reproducible y adaptable a contextos urbanos similares, adaptable a otras ciudades intermedias del Perú y Latinoamérica. Este enfoque constituye una alternativa confiable para las administraciones locales que buscan soluciones rápidas, medibles y sostenibles frente a la congestión vehicular.

Contribución de los autores

W. D. Valeriano: Conceptualización, curación de datos, adquisición de fondos, investigación, administración del proyecto, recursos y redacción del borrador original. **G. A. Flores:** Conceptualización, curación de datos, adquisición de fondos, investigación, administración del proyecto, recursos y redacción del borrador original. **R. G. Salazar-Calderón:** Análisis formal, metodología, supervisión, redacción-revisión y edición.

Conflictos de interés

Los autores manifiestan que no tienen conflictos de interés con respecto a esta publicación.

6. Referencias Bibliográficas

- Akyol, G., Silgu, M. A., Goncu, S., y Celikoglu, H. B. (2024). A bi-objective traffic signal optimization model for mixed traffic concerning pedestrian delays. *Transportation Research Procedia*, 78, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.024>
- Bedoya-Maya, F., Calatayud, A., y González-Mejía, V. (2022). Estimating the effect of road congestion on air quality in Latin America. *Transportation Research. Part D, Transport and Environment*, 113(103510), 103510. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103510>
- Calatayud, A., Sánchez González, S., Bedoya-Maya, F., Giraldez Zúñiga, F., y Márquez, J. M. (2021). *Congestión urbana en América Latina y el Caribe: Características, costos y mitigación*. Inter-American Development Bank. <http://dx.doi.org/10.18235/0003149>

- Del Mar, A. M., y Vásquez, I. E. (2019). *Propuesta para la reducción del congestionamiento vehicular en las avenidas La Marina y Faustino Sánchez Carrión, desde la Av. Antonio José de Sucre hasta la Av. Gregorio Escobedo, mediante el uso del software Synchro 8* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://upc.aws.openrepository.com/handle/10757/625953>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 2: Energy (Chapter 3: Mobile combustion)*. IGES. https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf
- Leal, S. S., y de Almeida, P. E. M. (2023). Traffic light optimization using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA2). *Scientific Reports*, 13(1), 15550. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38884-2>
- Macioszek, E. (2016). The application of HCM 2010 in the determination of capacity of traffic lanes at turbo roundabout entries. *Transport Problems*, 11(3), 51–60. <https://bibliotekanauki.pl/articles/375367>
- Mangones, S. C., Cuéllar-Álvarez, Y., Rojas-Roa, N. Y., y Osses, M. (2025). Addressing urban transport-related air pollution in Latin America: Insights and policy directions. *Latin American Transport Studies*, 3(100033), 100033. <https://doi.org/10.1016/j.latran.2025.100033>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine [NASEM]. (2010). *HCM2010 Highway Capacity Manual* (5th Ed.). The National Academies Press. <https://www.jpautoceste.ba/wp-content/uploads/2022/05/Highway-Capacity-Manual-2010-PDFDrive-.pdf>
- Rondoño, D. W. (2018). *Análisis vial en las intersecciones de la Av. Luzuriaga y San Martín con la Av. Raymondi – Huaraz aplicando el software Synchro 8.0, para mejorar el flujo vehicular* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. Repositorio UNSAM. <https://goo.su/iExB6>
- Sabando, I. F. (2017). *Determinación del nivel de servicio en calles urbanas* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María]. <https://goo.su/iExB6>
- Salazar-Calderón, R. G. (2019). *Evaluación del flujo vehicular para determinar el nivel de servicio en Av. Gustavo Pinto, Tacna* [Tesis de maestría, Universidad Privada de Tacna]. <https://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/1334>
- Shojaeyan, A., Kargar, A., y Reza Keymanesh, M. (2017). Phase optimization procedure for two-way synchronization of fixed traffic signals on an urban passageway in Washington City (USA). *American journal of civil engineering and architecture*, 5(3), 71–84. <https://doi.org/10.12691/ajcea-5-3-1>
- Transportation Research Board [TRB]. (2014). *Innovative Applications of the Highway Capacity Manual 2010 (Circular E-C190)*. Transportation Research Board. <https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/circulars/ec190.pdf>
- Wang, X., Jerome, Z., Wang, Z., Zhang, C., Shen, S., Kumar, V. V., Bai, F., Krajewski, P., Deneau, D., Jawad, A., Jones, R., Piotrowicz, G., y Liu, H. X. (2024). Traffic light optimization with



- low penetration rate vehicle trajectory data. *Nature Communications*, 15(1), 1306. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45427-4>
- World Bank. (2024, 15 de octubre). *Modernizing Traffic Management in Lima with World Bank Support*. World Bank Group. <https://goo.su/sQSt>
- Yu, X., y Sulijoadikusumo, G. (2012). Assessment of signalized intersection capacity considering downstream queue spillback. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 43, 60–69. <https://goo.su/PYA3>