



## Determinación del índice de congestión vial para zonas urbanas por medio de velocidades obtenidas con la API de Google Maps

### Estimating a Road Congestion Index for Urban Areas Based on Speed Data Retrieved from the Google Maps API

María T. Pardo-Amado<sup>1</sup>, Édgar Solano<sup>2</sup>, Yerly Martínez-Estupiñán<sup>3</sup> y Jhon J. Cáceres<sup>4</sup>

Fecha de Recepción: 2 de septiembre de 2023

Fecha de Aceptación: 16 de mayo de 2025

**Cómo citar:** M. T. Pardo-Amado, E. Solano, Y. Martínez-Estupiñán, y J. Cáceres. "Estimación del índice de congestión vial para zonas urbanas usando velocidades obtenidas con la API de Google Maps", *Tecnura*, 29(84), 25-53.  
<https://doi.org/10.14483/22487638.21214>

## Resumen

**Objetivo:** realizar la estimación del índice de congestión para vías urbanas en cinco ciudades capitales de Colombia, a partir de datos de velocidad extraídas de la API de Google Maps.

**Metodología:** se efectuó la revisión de diferentes metodologías existentes para la estimación de índices de congestión, selección de la metodología más acorde a la información disponible (información de velocidades extraída de la interfaz de programación de aplicaciones [API, por su sigla en inglés] de Google Maps) de las cinco ciudades objeto de estudio. Se procedió con el cálculo del índice de congestión para cada link que conforma la red urbana arterial primaria y secundaria de las ciudades en análisis, por medio de herramientas espaciales. Por último, se compararon los resultados con el comportamiento real del tráfico de cada ciudad.

**Resultados:** el índice de congestión representa de forma aceptable, tanto para la hora pico como para la hora valle, el nivel de congestión en la red urbana utilizada en las cinco ciudades de estudio.

**Conclusiones:** el uso de una metodología de estimación de índice de congestión que no requiere de muchos *inputs* para su aplicación, y que permite obtener resultados consistentes y confiables, muestra un gran potencial en un contexto macro de ciudad, y permite detectar en diferentes momentos el grado de congestión de la red o de determinadas intersecciones. Incluso, para la planificación de ciudad contribuye a la toma de decisiones sobre cuáles

<sup>1</sup>Ingeniera civil. Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas. Correo electrónico: [mariatepardo@gmail.com](mailto:mariatepardo@gmail.com)

<sup>2</sup>Ingeniero civil. Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas. Correo electrónico: [edgar.2630@hotmail.com](mailto:edgar.2630@hotmail.com)

<sup>3</sup>Docente de la Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas. Correo electrónico: [yefamar@uis.edu.co](mailto:yefamar@uis.edu.co)

<sup>4</sup>Docente de la Escuela de Ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Grupo de Investigación Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas. Correo electrónico: [jcaceres@uis.edu.co](mailto:jcaceres@uis.edu.co)

corredores o intersecciones deberían priorizarse en estudios de mayor profundidad y en términos de inversión.

**Palabras clave:** índice de congestión, velocidad, estado del tráfico, análisis geoespacial, API.

---

## Abstract

**Objective:** To estimate the Congestion Index for urban roads in five Colombian capital cities based on speed data retrieved from the Google Maps API.

**Methodology:** Review of existing methods for estimating congestion indexes, selection of the approach most consistent with the available information (speed data retrieved from the Google Maps API) for the five cities under study, calculation of the congestion index for each link within the primary and secondary urban arterial networks using spatial analysis tools, and, finally, comparison of the results with the observed traffic behavior in each city.

**Results:** The congestion index provides an acceptable representation of congestion levels in the urban networks of the five study cities, both during peak and off-peak hours. For the purposes of a research article, the analysis should be framed within a quantitative approach.

**Conclusions:** The use of a congestion index estimation methodology that requires few inputs while providing consistent and reliable results highlights the potential of this tool in a metropolitan context. It enables the identification of congestion levels across the network or at specific intersections at different times of day, and, at the urban planning level, supports decision-making on which corridors or intersections should be prioritized for more detailed studies and targeted investments.

**Keywords:** Congestion index, speed, state of Traffic Flow, geospatial analysis, API.

---

## Introduction

Durante el periodo 2009-2019, se registró un aumento en la población mundial del 12,2 %. Si se habla solo de la población urbana, el incremento fue del 22,2 % (Data Commons, s. f.), el cual está acompañado de un crecimiento del parque automotor urbano, ya que la mayoría de la ciudadanía opta por trasladarse en automóvil, situación que genera congestión en las redes viales de las principales ciudades y hace que se requiera más tiempo de lo usual para ir de un lugar a otro. Esto, lleva a una elevación en el gasto de combustible, en la polución del aire y la contaminación auditiva, entre muchas otras externalidades negativas. Este problema puede producir un mayor nivel de estrés en las personas, y agotarlas física y mentalmente, lo que se traduce en un deterioro en la calidad de la vida urbana (1).

En el Área Metropolitana de Bucaramanga, el parque automotor pasó de 703 075 vehículos en 2018, a 760 746 en el año 2020, que equivale a un aumento del 8,2 %, lo cual es un inconveniente para la movilidad en la zona urbana de Bucaramanga, si se tiene en cuenta que aproximadamente el 70 % de estos vehículos concurren las carreteras de esta ciudad (49). Como parte del diagnóstico de movilidad de cualquier zona urbana es indispensable conocer las

velocidades de circulación de los diferentes actores viales, para así detectar puntos críticos, denominados *cuellos de botella*, en diferentes momentos del día.

Gracias a la interfaz de programación de aplicaciones (API, por su sigla en inglés) de Google Maps, es posible extraer datos de velocidades, si se optimiza su tiempo de recolección (2,3), ya que se obtienen por medio de cada teléfono inteligente conectado a internet y ubicado en los vehículos que circulan por las vías. La información recopilada a partir de los datos de esta API permite clasificar el estado del embotellamiento vehicular y con ello estimar, entre muchos otros, un índice de congestión, el cual puede utilizarse fácilmente para la gestión y el control del tráfico urbano (4,5).

Por esta razón, en el presente documento se hallaron y estudiaron, desde una revisión sistemática de literatura, diferentes metodologías y alternativas para la medición cuantitativa de la congestión del tráfico urbano; también, las variables utilizadas, el tipo de estructura vial en la que es aplicada y los resultados con cada una de ellas. Adicionalmente, se compararon todas las metodologías respecto a unos criterios específicos de evaluación, como proporcionar un rango continuo de valores o evidenciar el nivel de servicio para cualquier tipo de vía, para finalmente, seleccionar una metodología. Esta se aplicó en las principales carreteras de la red vial urbana de cinco ciudades capitales de Colombia: Bucaramanga, Bogotá, Barranquilla Medellín y Cali, usando datos de velocidades obtenidos con la API de Google Maps.

Este documento está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el marco teórico de la investigación. En “Metodología” se muestra la revisión de la literatura, la definición de las metodologías, la descripción del caso de estudio y la recopilación de datos. En la sección 4 se realiza la estimación del índice de congestión y el análisis geoespacial. Por último, se exponen las conclusiones y sugerencias para futuras investigaciones.

## Marco teórico

A continuación, se presenta el marco teórico sobre el cual se fundamenta la investigación acerca de las metodologías existentes para la estimación de índices de congestión.

### Congestión vial en zonas urbanas

Generalmente, se piensa en la congestión como la situación en la que circulan muchos vehículos y cada uno de ellos avanza lenta e irregularmente [6]. Dependiendo del nivel de tránsito, los autos tienen la posibilidad de circular a una velocidad relativamente libre, influenciada por los límites de velocidad, la frecuencia de las intersecciones, etcétera. Sin embargo,

a volúmenes mayores, cada usuario adicional dificulta el desplazamiento de los demás, iniciando la congestión (7,8). Esto hace que puedan detectarse, de forma inmediata, los *cuellos de botella*, conocidos coloquialmente en diferentes ciudades de Colombia como “trancones”. Teóricamente, los cuellos de botella aparecen en aquellos tramos y situaciones donde la demanda vehicular supera la capacidad, es decir, el número de vehículos que llegan a este tramo es mayor a los que salen, generando problemas de congestión justamente en el segmento anterior al cuello de botella (9–11). Sin embargo, el usuario, quien finalmente define según su criterio el nivel de congestión, puede percibir reducciones considerables en su velocidad mucho antes, y por tanto asumir que ya está en un régimen de congestión (12,13), antes de llegar al momento en el que se satura la vía.

Al presentarse situaciones de congestión, se aumenta el tiempo requerido para ir de un lugar a otro, disminuyendo la magnitud de la velocidad de viaje, la cual se obtiene al dividir la distancia recorrida desde el inicio hasta el final del viaje entre el tiempo total que se demoró en recorrerla. En el tiempo total de recorrido se incluyen todas las demoras operacionales por disminuciones considerables de velocidad y detenciones provocadas por la vía, el tránsito y los dispositivos de control, en otras palabras, que no sean por voluntad propia del conductor. Esta velocidad es de gran ayuda para comparar condiciones de flujo en ciertas rutas, ya sea una con otra, o bien, en una misma ruta cuando se han hecho modificaciones para medir los efectos (14,15).

## Índice de congestión

Existe gran diversidad de indicadores que son empleados para medir la congestión (16,17). Debido a la disponibilidad de información por parte de las autoridades de tráfico, el indicador que comúnmente se usa es la relación entre el volumen y la capacidad vehicular, en donde si el resultado está entre 0 y 1, no hay congestión; pero si es mayor a 1, es porque se genera embotellamiento. Sin embargo, cuando se requiere un análisis más detallado, este indicador presenta una serie de supuestos que desconocen ciertos niveles intermedios, donde la percepción de congestión ya está latente (18,19), como sugerir que la congestión solo se presenta cuando se satura la capacidad de la vía.

Por otra parte, los usuarios muestran interés en información relacionada al tiempo requerido para realizar un determinado recorrido (20). Este hecho, sumado a las distintas tecnologías de la actualidad, que permiten medir los tiempos de viaje, ha puesto en tendencia índices de congestión basados en el tiempo empleado con relación al tiempo que se gastaría en condiciones de flujo libre para recorrer el mismo trayecto (21). Los resultados con este indicador serán mayores o iguales a 1, y cuanta más congestión haya, mayor será el valor de este índice (17,19).

Otra forma de calcular un indicador es con la relación entre la velocidad de flujo libre y la velocidad real, y al igual que el anterior indicador, tendrá un valor mayor o igual a 1, donde 1 corresponde a la situación en que no se presenta congestión (22).

Algunos procedimientos son un poco más complejos; por ejemplo, el índice de rendimiento de velocidad (razón entre la velocidad de viaje y el límite de velocidad establecido) multiplicado por la proporción de estado de no congestión (duración del estado de no congestión dividido en la duración del periodo de observación), arroja valores entre 0 y 1, y cuanto menor sea el resultado del índice, mayor será la congestión (23).

### **Interfaz de programación de aplicaciones de Google Maps**

Una alternativa que ha tomado relevancia para la recolección de datos de tráfico en una red vial urbana es la interfaz de programación de aplicaciones (API, por su sigla en inglés) de Google Maps. Cuando los usuarios encienden y habilitan el GPS de sus teléfonos inteligentes Android, estos envían bits anónimos de datos de ubicación a la base de datos de Google (24–26). Esta información permite a la compañía identificar trayectorias de movimiento, realizar análisis adicionales y proporcionar información (velocidades y tiempos de viaje). A medida que más conductores usan la aplicación, la información se vuelve más confiable. Por tanto, la empresa Google solo permite el acceso a datos a través de una API (27, 28).

En 2017, en la ciudad de Kaunas, Lituania, el estudio de la fluctuación y variabilidad estimada de los tiempos de viaje en automóvil, obtenidos mediante la API de Google Maps en varios momentos del día, arrojó dos períodos pico. Además, se realizó un análisis de accesibilidad de la zona, para lo cual se evaluó la conectividad de la red (27, 29).

Ese mismo año, se publicó una investigación realizada en Delhi, India, en la que se evaluaron los efectos de ambas fases (antes y después) de la implementación de una política de restricción de vehículos según el número de placa. En este estudio se obtuvieron velocidades para una muestra de carreteras de toda Delhi mediante la API de Google Maps, lo cual arrojó como resultado una reducción de menos del 20 % del flujo de automóviles y un incremento del flujo de vehículos motorizados de dos ruedas y autobuses. De esta manera se demostró que la medida de pico y placa no fue efectiva para reducir la contaminación en esta ciudad (2).

En el área metropolitana del Gran Cairo, Egipto, se realizó un estudio en 2020 para evaluar la exactitud de los tiempos de viaje libre y las velocidades de flujo libre obtenidas de la API de Google Maps. Estos se compararon con datos obtenidos con el método del vehículo flotante; así, mediante comparación y pruebas estadísticas, se demostró la gran precisión de la información

extraída de Google Maps (30).

Para ese mismo año, se investigó la efectividad de varias estrategias de contención para controlar el tráfico vehicular en las carreteras de Dhaka, Bangladesh, durante la pandemia por covid-19. En este estudio se consideró la velocidad de viaje para comprender el escenario de tráfico en las carreteras; cuanto mayor sea la velocidad de viaje, menor será el volumen de tráfico. Las velocidades se calcularon a partir de datos extraídos de Google Maps. Los resultados revelaron que la velocidad de viaje diaria promedio aumentó drásticamente después de implementar estrategias de contención, con lo cual se demostró que estas estrategias influyeron en el control del tráfico vehicular en las carreteras (31).

## Metodología

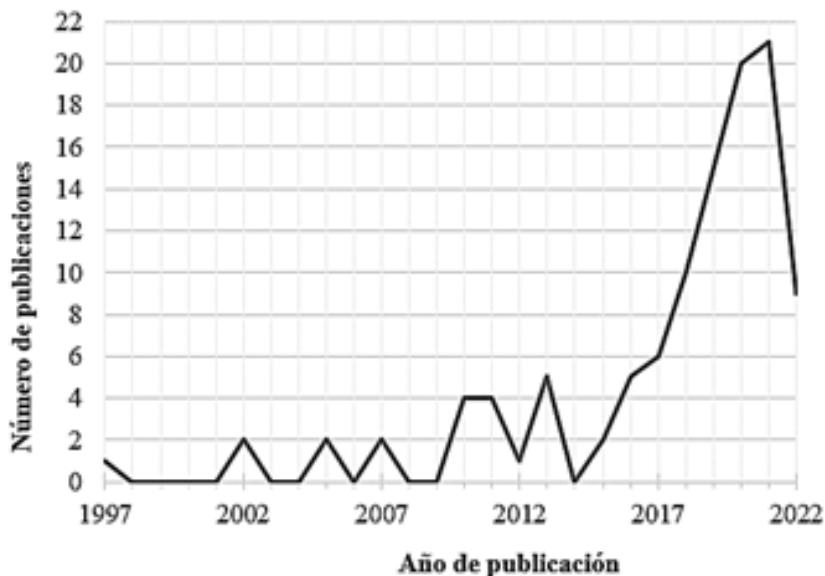
Se realizó una revisión bibliográfica de diversas metodologías relacionadas con la estimación de índices de congestión vial. Para esto, se establecieron criterios específicos de exclusión basados en la revisión del título con la investigación, el contenido, las conclusiones presentadas y la aplicabilidad de las metodologías propuestas. Aunque el objetivo principal de esta investigación no era realizar un estado del arte, sino mostrar un estudio práctico aplicado a zonas urbanas colombianas, se llevó a cabo inicialmente la revisión de la literatura para asegurar la selección de la metodología más adecuada a los datos disponibles.

### Revisión de estudios previos

En primer lugar, se efectuó una búsqueda de artículos relacionados con métricas para cuantificar la congestión urbana. El método de búsqueda utilizado para la filtración de información en la base de datos fue mediante matrices de palabras y operadores booleanos, que al combinarlos formaban una ecuación de búsqueda. La primera ecuación de búsqueda se usó en la Biblioteca Virtual de la Universidad Industrial de Santander y la base de datos Scopus y fue: (“traffic congestion” OR “traffic flow”) AND (“congestion index” OR “evaluation indexes”) AND (“congestion assessment” OR “state of traffic flow”), lo que permitió obtener un primer vistazo de los artículos enfocados en el tema de investigación. Para obtener resultados adicionales, se realizó una segunda búsqueda en Scopus mediante la ecuación: (“congestion index” OR “evaluation indexes”) AND (“travel speed” OR “overall speed”).

En la figura 1 se ilustra la evolución en la publicación de artículos de investigación en el tema “evaluación de la congestión”. En esta se observa una tendencia cambiante entre 1997 y 2014. Sin embargo, a partir de 2015 se visualiza un crecimiento acelerado en el número de artículos publicados al respecto, debido a los problemas de congestión que sufren, cada vez más, diferentes ciudades del mundo, y con ello, la necesidad de generar alternativas que ayuden a

minimizar estos problemas.



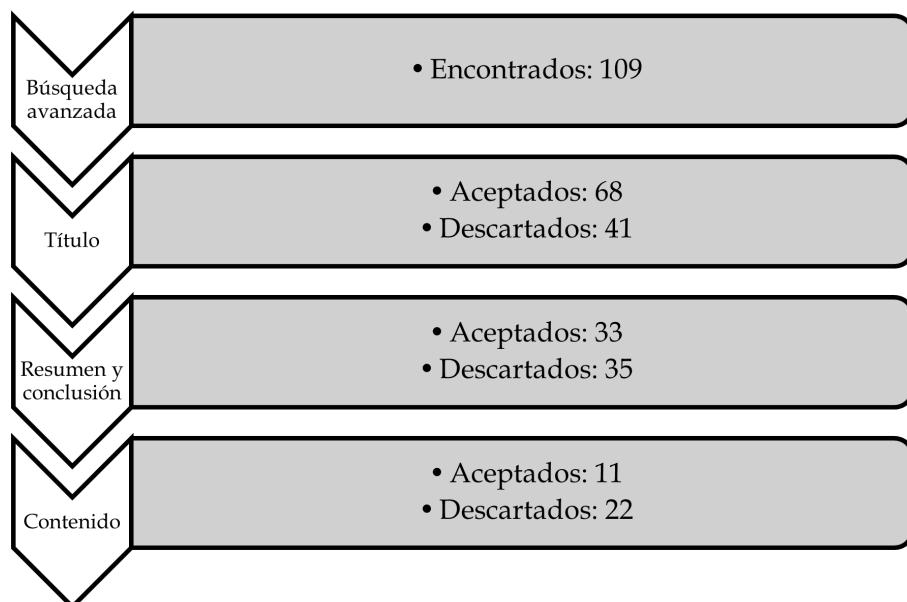
**Figura 1.** Publicaciones por año sobre índices de congestión

**Fuente:** autores.

Los criterios iniciales que fueron utilizados para excluir los artículos que no serían analizados en la investigación se presentan a continuación (*véase figura 2*):

- *Título.* No se incluyeron artículos cuyos títulos no indicaran relación con la evaluación de la congestión del tráfico.
- *Resumen y conclusión.* Se descartaron artículos cuyo resumen no expresaba una metodología propuesta para la evaluación de la congestión vehicular y no se concluyeran los resultados.
- *Contenido.* No se trabajaron en este estudio artículos en los que se presentaba una metodología en desarrollo o sin terminar.

En la figura 2 se muestra la evolución en el número de artículos una vez revisado cada uno de los criterios anteriores. Al final de este proceso quedaron 11 artículos principales que fueron analizados en profundidad. Los países que lideran la publicación de artículos relacionados con las alternativas para la evaluación de la congestión, según las metodologías revisadas, son China y Estados Unidos, respectivamente, que también son los países en donde más se utiliza el vehículo privado (*véase figura 3*).



**Figura 2.** Criterios de filtrado para la revisión de literatura

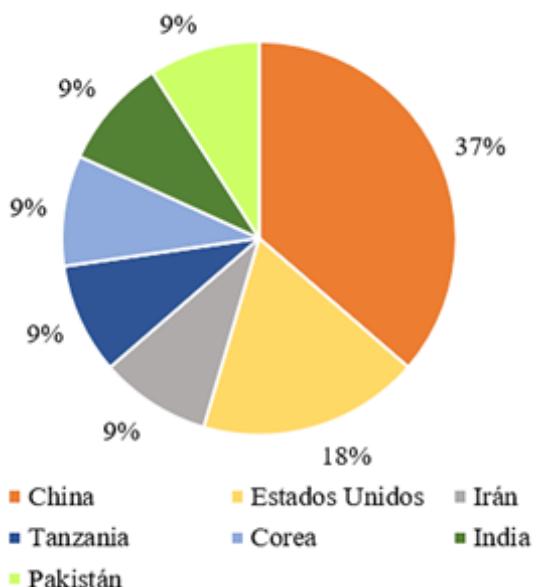
**Fuente:** autores.

La indagación de los artículos mediante este proceso sistemático de búsqueda sirvió como un primer filtro y permitió la consulta de información relacionada con los intereses de esta investigación y que provenía de fuentes confiables, lo que implicaba un ahorro de tiempo en la selección de los documentos analizados en la revisión de la literatura.

En el análisis se encontró que la metodología propuesta por (32) no fue aplicada con datos reales de tráfico como en los otros casos. En cambio, la información para la aplicación del método se obtuvo a partir de una simulación. El lugar de aplicación de la mayoría de las metodologías se realizó en la ciudad donde se desarrolló la investigación. En el caso de (33), se aplicó en una ciudad de Alemania y una de China, lo cual indica que una metodología se puede adaptar a un caso de estudio específico. Las metodologías trabajan dos variables en común, el tiempo o la velocidad, las cuales pueden hallarse de manera sencilla si se cuenta con los recursos necesarios como controles de monitoreo remoto, lo que las hace factibles y las posiciona por encima de otros métodos de evaluación de congestión del tráfico.

## Definición de las metodologías para la estimación de índices de congestión aplicado a zonas urbanas

A continuación, se describe cada una de las metodologías aceptadas después del proceso de filtrado explicado en la figura 2, con el fin de determinar aquella que mejor se ajuste a las características y datos que se puedan obtener de la zona de estudio.



**Figura 3.** Documentos publicados por países a partir de las metodologías revisadas

**Fuente:** autores.

En (34) se determinó un índice de congestión (CI) basado en inferencia difusa, el cual combina dos medidas tradicionales (velocidad de viaje y demora) y puede representar las condiciones del tráfico en segmentos de carreteras, corredores, o una red de carreteras. Esta metodología se aplicó en carreteras arteriales al norte del condado de Newcastle, en Delaware, Estados Unidos. La ecuación 1 presenta el cálculo de la tasa de velocidad de viaje (*TSR*), en donde *FFS* es la velocidad de viaje a flujo libre y *ATS* es la velocidad de viaje promedio:

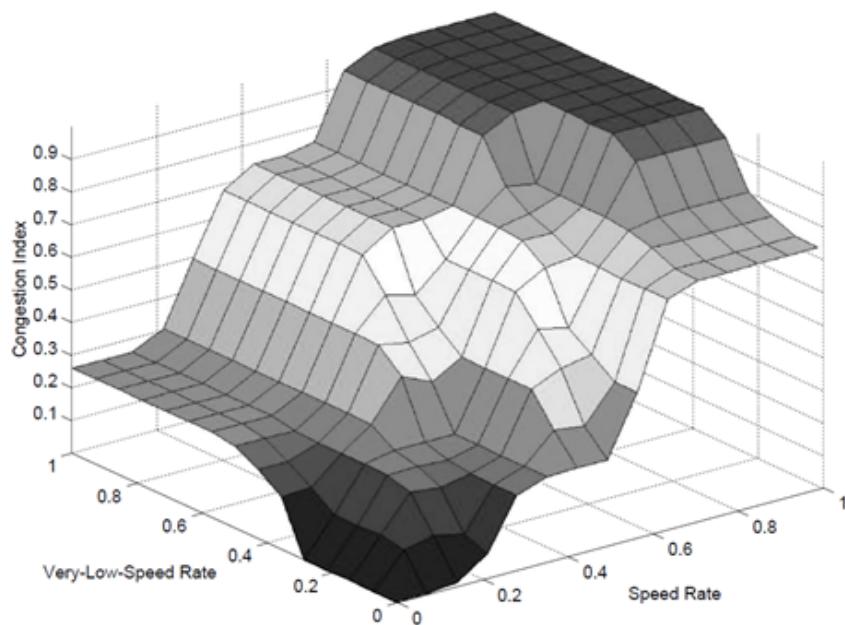
$$TSR = \frac{FFS - ATS}{FFS} \quad (1)$$

Por otra parte, la tasa de velocidad muy baja (*VLS*) se calcula como lo indica la ecuación 2, en donde *ST* es el tiempo de viaje cuando la velocidad es inferior a 8 km/h y *ATT* es el tiempo de viaje promedio:

$$VLS = \frac{S_T}{ATT} \quad (2)$$

Para combinar los dos valores obtenidos, es decir, *TSR* y *VLS*, y derivar una medida de congestión, se utiliza una base de reglas difusas del siguiente tipo: "si (*TSR* es *X*) y (*VLS* es *Y*), entonces (*CI* es *Z*)". Lo anterior se representa gráficamente de la figura 4.

En (35) se propone un índice de intensidad de congestión general (OCII, por su sigla en inglés), basado en inferencia difusa y funciones de pertenencia, el cual pondera cinco alternativas de índices de congestión. Este OCII se aplicó en dos autopistas y dos arterias principales de



**Figura 4.** Relación entre el índice de congestión, la tasa de velocidad de viaje y la tasa de velocidad muy baja

**Fuente:** tomado de (34).

Teherán, Irán, con datos tomados en las horas pico de la mañana y de la tarde. Para el cálculo del OCII se requieren variables como la velocidad de viaje ( $TSP$ ), la tasa de viaje ( $TRA$ ), la tasa de retraso ( $DRA$ ), la relación de tasa de viaje ( $TRR$ ) y la relación de retraso ( $DLR$ ), las cuales se estructuran en la ecuación 3:

$$OCII_A = 0,28\mu_A(TSP) + 0,13\mu_A(TRA) + 0,22\mu_A(DRA) + 0,16\mu_A(TRR) + 0,21\mu_A(DLR) \quad (3)$$

En este estudio, los datos son específicos de la ubicación, además, el tamaño de la muestra y la aleatoriedad estuvo limitada por los recursos de la investigación; sin embargo, esta metodología puede aplicarse a cualquier desarrollo del índice de congestión. Estos índices tienen un gran potencial en la gestión del tráfico y pueden utilizarse en el desarrollo de sistemas de transporte inteligentes (35).

En (37) se presentó un índice de congestión en redes viales urbanas ( $R$ ), el cual se aplicó en las redes de autopistas de Pekín, China, con datos proporcionados por la Oficina de Gestión de Tráfico de Pekín. Para este estudio, se dividió el estado del tráfico en cuatro categorías: congestión intensa, leve, suave y muy suave. En la ecuación 4 se muestra la operación para el cálculo del índice, en donde  $R_i$  es el índice de congestión de un segmento de carretera y  $L_i$  es la longitud de este:

$$R = \frac{\sum(R_i \cdot L_i)}{\sum L_i} \quad (4)$$

Con este método se evidencia la tendencia cambiante de las condiciones del estado del tráfico, es decir, se puede mostrar gráficamente cómo varía el índice cada cierto periodo de tiempo. En (32), se planteó el índice del grado de congestión del tráfico ( $R$ ), el cual se usó en una simulación para medir la fiabilidad de la selección de rutas de vehículos de emergencia. Este método tiene en cuenta el tiempo de viaje ( $T_t$ ) y el tiempo de viaje esperado ( $T_d$ ), como se muestra en la ecuación 5. Un valor de  $R$  bajo indica una ruta óptima, es decir, los tiempos de viaje serán menores. En el caso contrario, si se obtiene un grado de congestión alto, los tiempos de viaje serán mayores:

$$R = \frac{\sum(T_t - T_d)}{\sum T_d} \quad (5)$$

En 2018, (37) presentaron el índice de congestión ( $CI$ ), el cual exhibe una fuerte capacidad de cuantificación y evaluación, y está inspirado en el enfoque del “triángulo de resiliencia R4”. Esta metodología se aplicó en la Interestatal 80 (I-80), en el área de la Bahía de San Francisco, y en la autopista US-101, en Los Ángeles, Estados Unidos. Este  $CI$  se calcula como se muestra en la ecuación 6:

$$CI = \left( \frac{C_m \cdot C_t}{2} + R_e \right) * R_s \quad (6)$$

En donde:  $C_m$  es la magnitud de congestión,  $C_t$  es el tiempo de congestión,  $R_e$  es el coeficiente de resistencia y  $R_s$  es el escenario de recuperación. El enfoque basado en la resiliencia proporciona un ángulo único y diferente para abordar el problema de cuantificar la congestión, y sus dimensiones características son efectivas para capturar y diferenciar la congestión principal. Esta medida es aplicable tanto a casos de autopistas como a vías arteriales, y funciona adecuadamente en tráfico controlado por señales.

Dos índices de congestión del tráfico propuestos por (38) se aplicaron en una autopista urbana bidireccional de cuatro carriles, en Dalian, China.  $C1$  es el índice de congestión basado en la velocidad de viaje, y para su cálculo se necesitan variables como la velocidad de viaje ( $v^R$ ), la velocidad de viaje deseable ( $v$ ) y la velocidad de viaje mínima aceptable ( $v'$ ). Por otro lado,  $C2$  es el índice de congestión basado en la saturación de la vía, y para su cálculo se necesita el grado de saturación de la carretera ( $S$ ). Las ecuaciones 7 y 8 representan los índices  $C1$  y  $C2$ , respectivamente. Los dos métodos arrojan valores entre 0 y 10:

$$C1 = \begin{cases} 0; & v^R > v \\ \frac{v-v^R}{v-v'} * 10; & v' < v^R \leq v \\ 10; & v^R \leq v' \end{cases} \quad (7)$$

$$C2 = \begin{cases} \frac{S}{0,2} * 2; & S \leq 0,4 \\ \left( \frac{S-0,4}{0,2} * 2 \right) + 2; & 0,4 < S \leq 0,6 \\ \left( \frac{S-0,6}{0,15} * 2 \right) + 4; & 0,6 < S \leq 0,75 \\ \left( \frac{S-0,75}{0,15} * 2 \right) + 6; & 0,75 < S \leq 0,9 \\ \left( \frac{S-0,9}{0,2} * 2 \right) + 8; & 0,9 < S \leq 1 \\ 10; & S > 1 \end{cases} \quad (8)$$

El índice de congestión  $C1$  es más objetivo y consistente con las condiciones reales de la carretera, pues sus resultados fueron similares a los de campo; mientras que el índice de congestión  $C2$  no puede reflejar bien la condición del tráfico y tiene una gran desviación respecto al otro método.

El factor de congestión propuesto por (33) fue aplicado en la red de carreteras de Karamay, China, y en Colonia, Alemania. Los datos de tráfico para este estudio fueron reales y generados por *SUMO*, una plataforma de simulación de flujo de tráfico. El método se basa en la tasa de ocupación de la vía ( $ftx(m)$ ) y está representado en la ecuación 9, en la que  $l$  es la longitud media de los vehículos,  $v_0$  es la velocidad media de la carretera y  $n$  los muestreos de la densidad de vehículos:

$$c_{cf}^x(t) = \frac{\left( \sum_{m=1}^n l \left( \frac{ftx(m)}{v_0} \right) \right)^2}{n \sum_{m=1}^n \left( l \left( \frac{ftx(m)}{v_0} \right) \right)^2} \quad (9)$$

El índice puede expresar con precisión el grado de congestión de la red vial en función de los datos de tráfico previstos y en tiempo real para diferentes ciudades, redes viales, estructuras viales, modos de tráfico y tipos de datos de muestreo.

En la red de carreteras urbanas de Dar es-Salam, Tanzania, se aplicó el índice de retraso en el tiempo de viaje ( $TD_{TI}$ ) y de congestión ( $CI$ ) propuesto por (39). La recolección de datos se llevó a cabo en arterias y subarterias viales que recurrentemente están congestionadas, por medio del método del automóvil en movimiento. Para la estimación de los índices se utilizó el tiempo promedio a flujo libre ( $FFT$ ) y el retraso en el tiempo de viaje ( $TD$ ), mostrados en las siguientes ecuaciones:

$$TD_{TI} = \frac{FFT}{TD} \quad (10)$$

$$CI = \frac{TD - FFT}{FFT} \quad (11)$$

La aplicación de estas metodologías arrojó que los valores bajos de  $TD_{TI}(TD_{TI} \leq 0,40)$  y valores altos de  $CI(CI > 0,5)$  representan la congestión del tráfico, mientras que los valores altos de  $TD_{TI}(TD_{TI} > 0,70)$  y bajos de  $CI(CI \leq 0,5)$  indican un flujo libre.

En (40), se estudia el índice de reconocimiento de congestión geoespacial (SCRIN), aplicándolo en cuatro arterias principales de la ciudad de Seúl, a partir de velocidades de viaje. SCRIN representa la condición de sobresaturación de los links o tramos viales individuales y puede expandirse para ser aplicable a unidades de intersecciones, corredores y redes. El modelo se construyó para que se limite a una red urbana con intersecciones señalizadas, permitiendo monitorear macroscópicamente dos características de la congestión, la intensidad y duración; sin embargo, también puede realizar el análisis microscópico de la congestión, ya que muestra la intensidad de esta en unidades de al menos 15 minutos, por lo que es posible monitorear una zona horaria específica donde ocurre la congestión.

Los valores de SCRIN se representan en una gráfica en la cual la intensidad media de la congestión ( $S$ ) se ubica en el eje de las abscisas y la duración de la congestión ( $FT$ ) se ubica en el eje de las coordenadas. El valor  $S$  se calcula como lo indica la ecuación 12, en donde  $FI$  es la intensidad de congestión acumulada:

$$S = \frac{FI}{FT} \quad (12)$$

El modelo SCRIN puede utilizarse para establecer un plan de mejora del tráfico. También sirve para seleccionar rutas menos congestionadas entre rutas alternativas. En India, (41) estimaron el índice de búfer de tiempo ( $BTI$ ) para dos vías arteriales de seis carriles.  $BTI$  representa la necesidad del viajero de poner tiempo adicional en su tiempo medio de viaje para asegurarse de llegar a tiempo. La ecuación 13 muestra la operación necesaria para el cálculo del índice, donde  $ptt$  hace referencia al percentil 95 de tiempo de viaje y  $mtt$  al tiempo medio de viaje:

$$BTI = \frac{ptt - mtt}{mtt} \quad (13)$$

De acuerdo con la composición vehicular y la distribución de carriles, existe una variación en el tiempo de viaje y en los índices de congestión; sin embargo,  $BTI$  muestra resultados adecuados en condiciones de tráfico mixto.

En (42), se determina un índice de congestión ( $CI$ ), utilizando el tiempo de viaje ( $tL$ ) y el menor tiempo de viaje ( $tO$ ) para las carreteras principales de Islamabad y Rawalpindi, como se indica en la ecuación 14:

$$CI = \frac{t_L - t_O}{t_O} \quad (14)$$

## Clasificación y selección de la metodología a utilizar en el caso de estudio

Con las metodologías descritas anteriormente y conociendo qué presenta cada una, se definieron diferentes criterios para determinar cuál sería la mejor opción a la hora de aplicarla en una determinada zona urbana, como se muestra en la tabla 1. La casilla en donde se marque una equis (*X*) indica que esa metodología sí cumple con ese criterio. Teniendo en cuenta que todos los criterios tienen el mismo valor, al finalizar se realiza un conteo y se selecciona aquella metodología que obtenga la mayor puntuación.

A continuación, con el propósito de definir si la metodología cumple o no, se describe lo que tiene en cuenta cada criterio de evaluación:

- *¿Es detallada?* Si la metodología explica sus características, especifica su procedimiento y llega a un resultado claro o tangible, entonces cumple con este criterio.
- *¿Es comprensible?* Si la metodología es simple y no presenta complicaciones para que cualquier usuario interprete el procedimiento y los resultados fácilmente, entonces cumple con este criterio.
- *¿Se aplicó?* Si la metodología se aplicó en un caso de estudio real, entonces cumple con este criterio.
- *¿Usa variables disponibles?* Si la metodología utiliza datos básicos sin que se presente ninguna restricción para su obtención, entonces cumple con este criterio.
- *¿Proporciona un rango continuo de valores?* Si los resultados que se obtienen con la metodología son valores cuantitativos y están dentro de un intervalo determinado, entonces cumple con este criterio.
- *¿Refleja el nivel de servicio para cualquier tipo de vía?* Si la metodología se aplicó en diferentes tipos de vía (autopistas, arterias o subarterias urbanas), o no se limita a condiciones específicas de la vía, como la presencia o ausencia de intersecciones semaforizadas, entonces cumple con este criterio.
- *¿Se puede utilizar con fines predictivos y de análisis estadístico?* Si la metodología proporciona datos que pueden ser utilizados para la predicción y el análisis estadístico de la congestión, entonces cumple con este criterio.
- *¿Ofrece valores comparables a diferentes tipos de zona urbana?* Sí la metodología se aplicó en distintas zonas de estudio o no se limita a variables específicas de un lugar, entonces cumple con este criterio.

**Tabla 1.** Clasificación y selección de la metodología de cálculo de índice de congestión

Metodología	¿Es detallada?	¿Es comprensible?	¿Se aplicó?	¿Usa variables disponibles?	¿Proporciona un rango continuo de valores?	¿Refleja el nivel de servicio para cualquier tipo de vía?	¿Se puede utilizar con fines predictivos y de análisis estadístico?	¿Ofrece valores comparables a diferentes tipos de zona urbana?	$\Sigma$
(34)			X		X	X	X	X	5
(35)			X	X	X		X		4
(36)	X	X	X	X	X		X	X	7
(32)	X	X		X	X		X		5
(37)			X		X	X	X	X	5
(38)	X	X	X	X	X		X	X	7
(33)			X		X	X	X	X	5
(39)	X	X	X	X	X	X	X	X	8
(40)	X	X	X	X	X		X	X	7
(41)	X	X	X	X	X		X	X	7
(42)	X	X	X	X	X	X	X	X	8

Fuente: autores.

Según lo anterior, se obtienen las metodologías propuestas por (39) y (42) como las recomendadas para la estimación de índices de congestión en zonas urbanas, ya que cumplen con los criterios mínimos que una buena medida de congestión debe tener (43, 44). Por tanto, en esta investigación se trabajó con la metodología de (42), ya que los datos de tráfico se obtuvieron mediante la API de Google Maps, al igual que el caso de estudio que se presenta en este documento.

## Descripción de la zona de estudio

Las zonas de análisis en las cuales se centró el caso tipo de esta investigación se conformaron por la red vial arterial primaria, secundaria e intermedia de las cinco ciudades capitales de Colombia: Bogotá, Bucaramanga, Cali, Medellín y Barranquilla. La red vial arterial, tanto primaria como secundaria, posibilita la circulación de mediana y larga distancia en el área urbana de estas cinco ciudades, y en ellas se da el mayor flujo vehicular y se presenta la mezcla de tráficos.

El grupo de investigación de Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas, adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, en conjunto con la Facultad de Salud Pública de la Universidad Industrial de Santander y Minciencias, desarrollaron

el proyecto de investigación titulado “Calidad del aire y salud ambiental urbana en cinco ciudades de Colombia” (45), cuyo objetivo fue estimar la exposición crónica a contaminantes del aire y ruido ambiental y su variación geográfica, y evaluar sus efectos sobre la salud humana en cinco ciudades capitales de Colombia; por consiguiente, los datos de velocidades utilizados para esta investigación forman parte del proyecto mencionado.

Los datos para la estimación del índice de congestión se obtuvieron mediante un aplicativo para la extracción de velocidades de tráfico en zonas urbanas, desarrollado durante el proyecto de investigación mencionado en el párrafo anterior (46). Este aplicativo, que trabaja con la API de Google Maps, suministra tiempos de viaje con un número conveniente de vehículos de prueba (celulares inteligentes), sin que se requiera una gran inversión económica. Estos tiempos se obtienen de los usuarios de las vías, por medio de sus teléfonos inteligentes, en períodos pasados. Esta aplicación puede extraer tiempos de viaje para una zona muy detallada, en repetidas ocasiones durante todo el día, para analizar la variabilidad del tiempo de viaje a escala de ciudad. Sin embargo, es posible que un cambio inesperado en las condiciones del tráfico no sea evidente en los tiempos de viaje suministrados; y algunos tramos de la red vial no siempre estén correctamente definidos en Google Maps y esto puede conducir a tiempos de viaje erróneos (27, 30, 47).

Los datos que se tomaron corresponden a las velocidades de viaje en cada *link* de las redes viales de las ciudades analizadas, para un total de nueve días, de los cuales seis son de marzo de 2022, y tres, de junio de 2022; esto con el fin de visualizar la variación en las condiciones del estado de tráfico entre un mes activo y uno vacacional. Estas velocidades se tomaron para la hora valle (10:00 a. m. a 11:00 a. m.) y la hora pico (5:30 p. m. a 6:30 p. m.).

## Resultados

En esta sección se describe el proceso para la estimación del índice y se presentan los resultados obtenidos.

### Estimación del índice de congestión

Con los datos recopilados (46), se determinó el índice con la metodología propuesta por (42). A continuación, se muestra el cálculo tipo del índice de congestión para el *link* identificado con el número 1211, ubicado en la carrera 27 de la ciudad de Bucaramanga, la cual constituye una de las arterias primarias de la ciudad. Este *link* tiene una longitud de 100 metros. Se buscó la velocidad máxima entre los datos del mes de marzo y se registró que es la correspondiente al horario valle del día 6, con un valor de 40 km/h. Esta velocidad se toma como referencia para

calcular el menor tiempo de viaje en este *link* ( $t_0$ ) en los días de marzo, tal como se indica a continuación:

$$t_0 = \frac{\text{Distancia}}{\text{Velocidad}}$$

$$t_0 = \frac{0,1 \text{ [km]}}{40 \text{ [km/h]}} * \frac{60 \text{ [min]}}{1 \text{ [h]}}$$

$$t_0 = 0,15 \text{ [min]}$$

Para el mismo día, se obtuvo una velocidad de viaje de 7,2 km/h en el horario pico, con la cual se halla el tiempo de viaje en el link ( $t_L$ ):

$$t_L = \frac{\text{Distancia}}{\text{Velocidad}}$$

$$t_L = \frac{0,1 \text{ [km]}}{7,2 \text{ [km/h]}} * \frac{60 \text{ [min]}}{1 \text{ [h]}}$$

$$t_L = 0,833 \text{ [min]}$$

Con estos datos, se puede calcular el índice de congestión (CI) correspondiente al horario pico del 6 de marzo de 2022.

$$CI = \frac{t_L - t_0}{t_0}$$

$$CI = \frac{0,833 - 0,15}{0,15}$$

$$\mathbf{CI = 4,553}$$

El cálculo de  $t_L$  y  $CI$  se realiza para cada día y horario de los cuales se tienen datos. Una vez que se tienen todos los índices calculados, se promedian teniendo en cuenta si es de horario valle o pico, y si corresponde a un día típico o a uno atípico; de esto resultan cuatro diferentes indicadores para marzo: índice de congestión en horario valle y día típico (CIVT), índice de congestión en horario pico y día típico (CIPT), índice de congestión en horario valle y día atípico (CIVA), y, por último, índice de congestión en horario pico y día atípico (CIPA). Este procedimiento se repite para los datos obtenidos del mes de junio.

En la tabla 2 se presenta la clasificación dada por (42), con la cual se determina el estado del nivel de tráfico, según el rango en el que se encuentre el índice de congestión. Esta clasificación se utiliza para la representación de los resultados obtenidos en este estudio.

**Tabla 2.** Estado del nivel de tráfico según el índice de congestión de congestión

CI	Estado del nivel de tráfico	Convención
0-0,15	Fluido	Verde
0,15-0,35	Ligeramente congestionado	Azul
0,35-0,65	Congestionado	Ambar
0,65-2,0	Altamente congestionado	Naranja
>2,0	Embotellamiento	Rojo

**Fuente:** autores a partir de (42).

Según lo anterior, se obtiene que para el *link* 1211, el 6 de marzo en horario pico, se tuvo un estado del nivel de tráfico de embotellamiento, ya que:

$$CI_{1211} = 4,553 > 2,0 \rightarrow \text{Embotellamiento}$$

Al determinar el índice de congestión para el caso de estudio tipo, se ve la necesidad de replicar la metodología en otras ciudades donde es creciente el problema de congestión, como Barranquilla, Cali, Medellín y Bogotá, lo que arroja como resultado un banco de datos sobre la clasificación del estado de nivel de tráfico para las principales ciudades de Colombia.

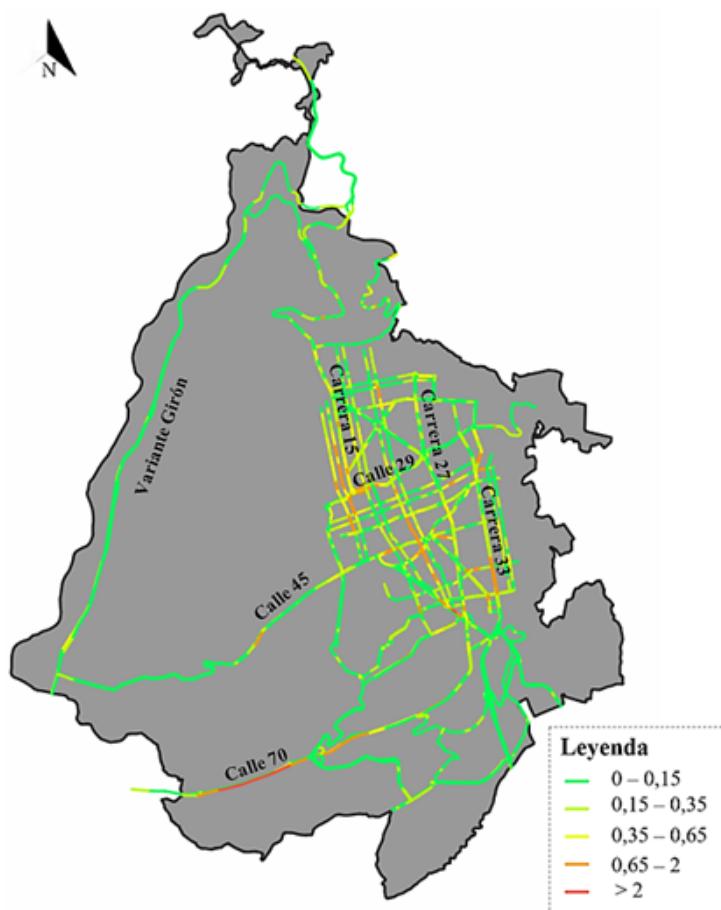
## Análisis geoespacial

Con los resultados sobre la estimación del índice, se realiza una representación geoespacial para la ciudad de Bucaramanga (48), como se muestra en las figuras 5 y 6.

Comparando las figuras anteriores, pueden detectarse tramos viales que, en días típicos, independientemente de si es hora pico o valle, se mantienen congestionados o su índice de congestión es mayor a 0,35 (*véase* tabla 2), como lo son las carreras 15, 27 y 33. Esto se relaciona con que el traslado de las personas en esta ciudad predomina en el sentido sur-norte y viceversa, y estos corredores permiten atravesar la zona urbana en esos sentidos. En la figura 7, se muestra una parte de la carrera 27 (a) y la carrera 33 (b).

Por otra parte, tres de los cuatro accesos que tiene la glorieta ubicada en la calle 15 con avenida Quebradaseca presentan congestión tanto en hora pico como en hora valle; por tanto, podría afirmarse que esta infraestructura no ofrece la capacidad vehicular suficiente para evitar que se presenten tiempos de espera considerablemente altos.

Según los resultados para la ciudad de Bucaramanga, se efectuó el mismo análisis para las principales ciudades de Colombia como Barranquilla, Cali, Medellín y Bogotá. En la figura 8,



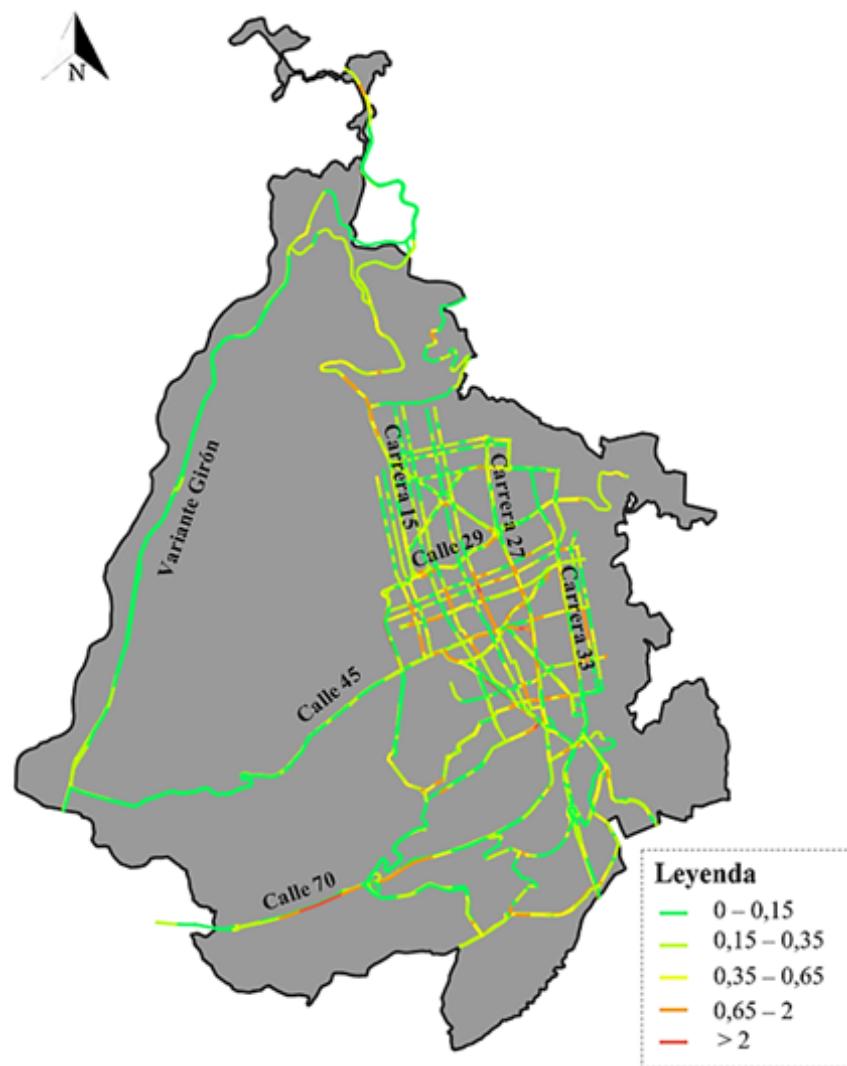
**Figura 5.** Índice de congestión promedio en horario valle para días típicos del mes de marzo

**Fuente:** autores.

se presenta gráfica y espacialmente la clasificación del tráfico obtenida en función del índice de congestión calculado.

### Validación de la metodología aplicada

En esta sección se presenta el análisis comparativo realizado para la red de la ciudad de Bogotá, para el cual se tuvo en cuenta la comparación gráfica y espacial del indicador de congestión obtenido de dos fuentes de información diferentes. La primera fuente de información corresponde a las velocidades obtenidas mediante el uso de la API de Google Maps, y la segunda, a los registros de velocidades de la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) provenientes del Plan de Monitoreo con el que cuenta Bogotá.



**Figura 6.** Índice de congestión promedio en hora pico para días típicos del mes de marzo

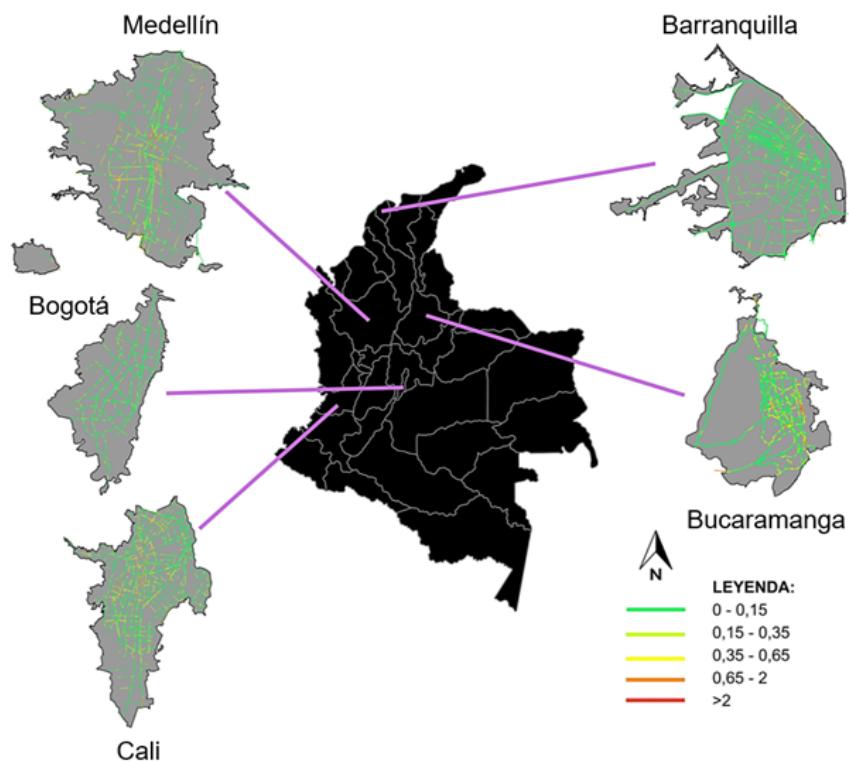
**Fuente:** autores.

A partir de los datos tomados de la API de Google Maps y la SDM, se aplica el procedimiento mencionado y se realiza la comparación entre índices, con un parámetro de rango de no congestionamiento aceptable [0-0,35] (*véase tabla 2*). De esto se obtiene que las redes viales con gran similitud en cuanto a la clasificación del índice son las avenidas Boyacá, Medellín, Ciudad de Cali, Paseo de los Libertadores, y de las Américas; vías principales por las que a diario circula una gran cantidad de vehículos y que además permiten la conexión norte-sur y occidente-oriente.



**Figura 7.** Ejemplos de tramos críticos de la zona de estudio para días típicos de marzo: (a) carrera 27; (b) carrera 33, en Bucaramanga

**Fuente:** autores.



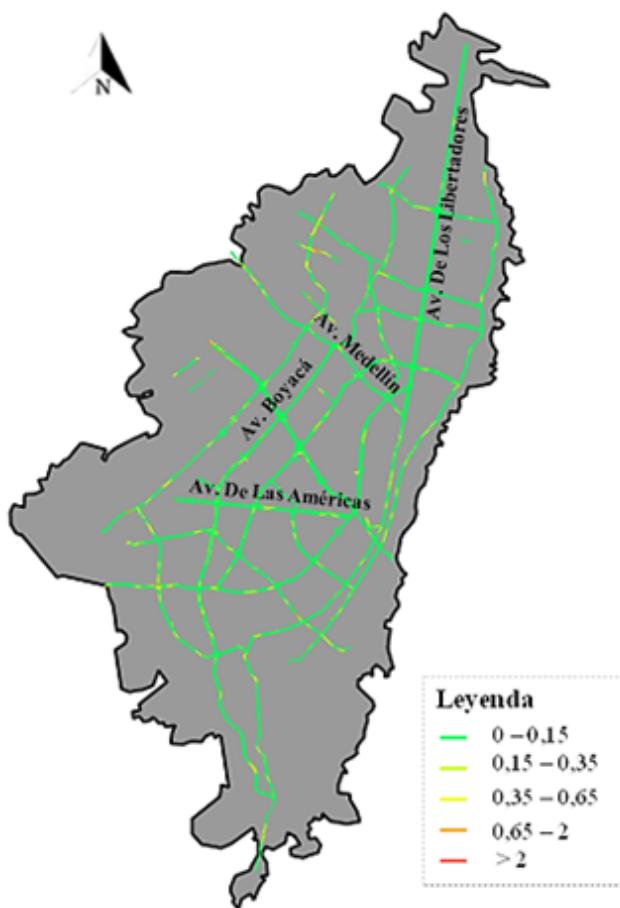
**Figura 8.** Representación del índice de congestión para las ciudades principales de Colombia

**Fuente:** autores.

## Conclusiones

De las metodologías identificadas en este trabajo de investigación, puede afirmarse que la mayoría de ellas utilizan como variables principales tiempos o velocidades de viaje, las cuales son usadas por su disponibilidad. Sin embargo, cabe aclarar que para su recopilación en este trabajo fue necesario desarrollar un programa que permitiera su extracción desde la interfaz de Google Maps (46). Adicionalmente, algunas metodologías buscan combinar dos o más alternativas de medición en una sola, y en la que recurren a porcentajes de ponderación o lógica de inferencia difusa que les permiten no sesgar los resultados a una única medida.

Según la evaluación a las diferentes metodologías, se encontró que dos de ellas se adaptaban mejor a las condiciones viales de la ciudad; sin embargo, se optó por aquella que coincidía con el método de recolección de los datos planteado para la presente investigación. De las metodologías descartadas predomina la aplicación en vías de gran capacidad como autopistas, lo que se convierte en un inconveniente a la hora de implementarla en redes viales que carecen de esta infraestructura vial, como el caso de estudio de esta investigación.

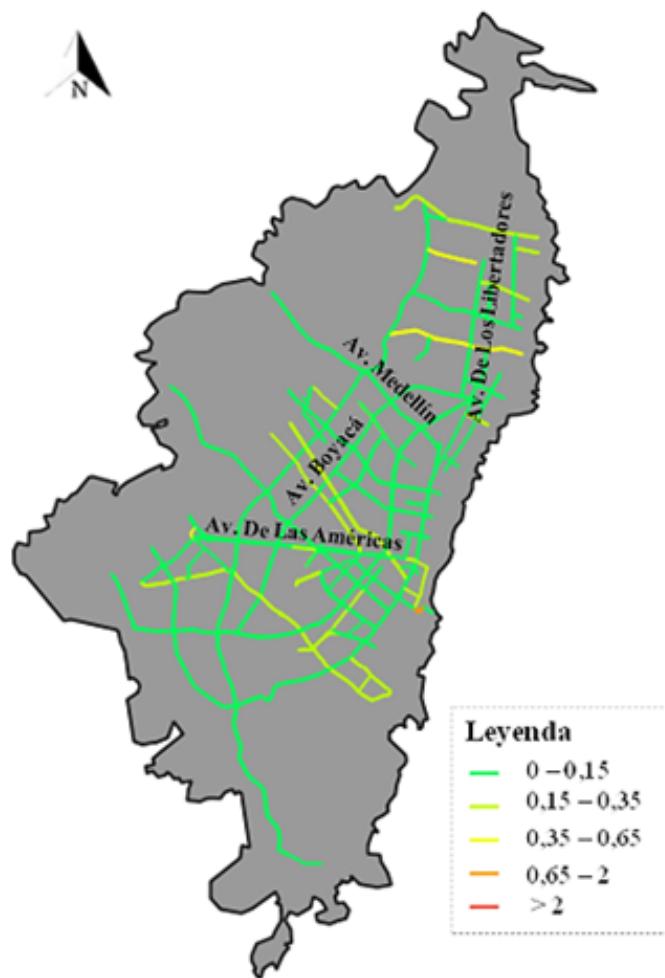


**Figura 9.** Representación del índice de congestión para datos obtenidos por medio de la API de Google Maps para Bogotá

**Fuente:** autores.

Una metodología de estimación de índice de congestión que no requiere de muchos *inputs* para su aplicación, y que arroja resultados consistentes y confiables, muestra un gran potencial en un contexto macro de ciudad; permite registrar en diferentes momentos el grado de congestión de la red o de determinadas intersecciones; contribuye, a nivel de planificación de ciudad, a la toma de decisiones sobre cuáles corredores o intersecciones deberían ser priorizadas en estudios de mayor profundidad y en términos de inversión.

La interfaz de programación de aplicaciones (API) de Google Maps suministra datos de tráfico, como tiempo y posición, en redes viales de gran extensión y en períodos distintos de tiempo, lo que permite estudiar el comportamiento del tráfico en gran escala y en temporadas



**Figura 10.** Representación del índice de congestión para datos proporcionados por la SDM para Bogotá

**Fuente:** autores.

del año indistintas. Sin embargo, esta herramienta no permite obtener información del tráfico como volumen, densidad vehicular, etcétera, que es utilizada para evaluar el nivel de servicio en las vías.

Por otra parte, los indicadores de congestión son de gran utilidad para evaluar la efectividad de proyectos de mejoramiento de la infraestructura vial como glorietas o intercambiadores viales, además de estrategias de control del tráfico como la restricción de vehículos por el número de placa, prácticas de vehículo compartido, o peajes urbanos.

En investigaciones futuras, se podría estudiar el impacto en la congestión que generaría la implementación de nueva infraestructura en la ciudad como ciclorutas o cables aéreos, los

cuales buscan disminuir el uso del vehículo privado, lo que a su vez reduciría la saturación en las vías. Los estudios que se desprenderían de esta investigación llevarían al desarrollo de un índice de congestión basado en las características propias de la zona urbana de Bucaramanga y de las otras ciudades en estudio, o la aplicación de un indicador para la ejecución de un sistema inteligente de transporte público en la ciudad.

## Referencias

- [1] D. A. Hennessy, y D. L. Wiesenthal, "Traffic congestion, driver stress, and driver aggression", *Aggressive Behavior: Official Journal of the International Society for Research on Aggression*, vol. 25, n.º 6, pp. 409–423, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2337\(1999\).](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2337(1999).)
- [2] D. Mohan, G. Tiwari, R. Goel, *et al.*, "Evaluation of odd–even day traffic restriction experiments in Delhi, India", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2627, n.º 1, pp. 9–16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3141/2627-02.>
- [3] N. I. Herrera-Herrera, S. Luján-Mora, y E. R. Gómez-Torres, "Integration of tools for decision making in vehicular congestion", *Dyna*, vol. 85, n.º 205, p. 363, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.67745>
- [4] A. Muñoz-Villamizar, E. L. Solano-Charris, M. AzadDisfany *et al.*, "Study of urban-traffic congestion based on Google Maps API: the case of Boston", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, n.º 1, pp. 211–216, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.079>
- [5] S. Mostafi, y K. Elgazzar, "An open source tool to extract traffic data from Google Maps: limitations and challenges", en *2021 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, oct. 2021, pp. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISNCC52172.2021.9615680>
- [6] R. Arnott, y K. Small, "The economics of traffic congestion", *American Scientist*, vol. 82, n.º 5, pp. 446–455, 1994.
- [7] I. Thomson, y A. Bull, *La congestión del tránsito urbano: Causas y consecuencias económicas y sociales*, Serie Recursos Naturales e Infraestructura, n.º 25. Santiago de Chile: Cepal, 2001.
- [8] T. Z. A. Verdezoto, F. F. C. Montes, y O. B. R. Medina, "Análisis del congestionamiento vehicular para el mejoramiento de vía principal en Guayaquil-Ecuador", *Gaceta Técnica*, vol. 21, n.º 2, pp. 4–23, 2020. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21905.04960>.
- [9] R. Cal y Mayor, y J. Cárdenas, *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones*, 8.ª ed., Ciudad de México: Alfaomega, 2007.

- [10] J. Long, Z. Gao, H. Ren *et al.*, "Urban traffic congestion propagation and bottleneck identification", *Science in China Series F: Information Sciences*, vol. 51, n.º 7, pp. 948–964, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11432-008-0038-9>.
- [11] A. De Palma, y R. Lindsey, "Traffic congestion pricing methodologies and technologies", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, n.º 6, pp. 1377–1399, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2011.02.010>.
- [12] T. Bonald, y J. W. Roberts, "Congestion at flow level and the impact of user behaviour", *Computer Networks*, vol. 42, n.º 4, pp. 521–536, 2003. DOI: DOI: [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(03\)00200-7](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(03)00200-7).
- [13] C. van Driel, *Driver support in congestion: an assessment of user needs and impacts on driver and traffic flow*, tesis Ph. D., University of Twente, Enschede, Netherlands, 2007.
- [14] E. T. Verhoef, y J. Rouwendal, "A behavioural model of traffic congestion: endogenizing speed choice, traffic safety and time losses", *Journal of Urban Economics*, vol. 56, n.º 3, pp. 408–434, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jue.2004.05.003>.
- [15] M. Aftabuzzaman, "Measuring traffic congestion: a critical review", en *Proc. 30th Australasian Transport Research Forum*, vol. 1, Melbourne, Australia, sep. 2007.
- [16] G. Beliakov, M. Gagolewski, S. James *et al.*, "Measuring traffic congestion: an approach based on learning weighted inequality, spread and aggregation indices from comparison data", *Applied Soft Computing*, vol. 67, pp. 910–919, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.07.014>.
- [17] N. Gore, S. Arkatkar, G. Joshi *et al.*, "Developing modified congestion index and congestion-based level of service", *Transport Policy*, vol. 131, pp. 97–119, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2022.12.008>.
- [18] J. Eliasson, M. Börjesson, D. van Amelsfort *et al.*, "Accuracy of congestion pricing forecasts", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 52, pp. 34–46, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.04.004>.
- [19] Á. García, "Análisis de la relación entre el índice de congestión y el consumo de combustible basado en datos empíricos", en Proc. XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2014), Santander, España, 2014.
- [20] C. G. Chorus, E. J. Molin, y B. Van Wee, "Use and effects of advanced traveller information services (ATIS): a review of the literature", *Transport Reviews*, vol. 26, n.º 2, pp. 127–149, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441640500333677>.

- [21] E. Ben-Elia, y E. Avineri, "Response to travel information: a behavioural review", *Transport Reviews*, vol. 35, n.º 3, pp. 352–377, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1015471>.
- [22] H. Bi, Z. Ye, y H. Zhu, "Data-driven analysis of weather impacts on urban traffic conditions at the city level", *Urban Climate*, vol. 41, p. 101065, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.101065>.
- [23] D. Méndez T., Curso: Ingeniería de Tránsito, Maestría en Vías Terrestres, [s.l.], 2009, p. 11.
- [24] T. Ataiwe, N. Salman, y H. Ismael, "Identify traffic congestion using speed data measured by GIS, GPS technique", *Iraqi Journal of Science*, vol. 53, n.º 4 appendix, pp. 1156–1161, 2012.
- [25] B. P. Loo and Z. Huang, "Delineating traffic congestion zones in cities: an effective approach based on GIS", *Journal of Transport Geography*, vol. 94, p. 103108, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103108>.
- [26] F. Ding, Y. Wang, G. Cai *et al.*, "Design and evaluation of traffic congestion index for Yancheng City", en *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Engineering and Networks*, Singapur: Springer, 2021, pp. 757–766. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-15-3753-0\\_74](https://doi.org/10.1007/978-981-15-3753-0_74).
- [27] V. Dumbliauskas, V. Grigonis, y A. Barauskas, "Application of Google based data for travel time analysis: Kaunas City case study", *Promet – Traffic & Transportation*, vol. 29, n.º 6, pp. 613–621, 2017.
- [28] S. Sabet, F. Namdarpour, y M. Mesbah, "A cost-effective methodology to compare travel time and speed: a tale of 11 cities", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering – Municipal Engineer*, vol. 175, n.º 2, pp. 84–94, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmuen.20.00038>.
- [29] M. Tresidder, *Using GIS to measure connectivity: an exploration of issues*, Portland State University, Field Area Paper, pp. 1–43, 2005.
- [30] A. Alsobky, y R. Mousa, "Estimating free flow speed using Google Maps API: accuracy, limitations, and applications", *Advances in Transportation Studies: An International Journal*, sección A, vol. 50, pp. 49–64, 2020.
- [31] N. M. Zafri, S. Afroz, y M. A. Ali, "Effectiveness of containment strategies to control vehicular traffic on roads in Dhaka, Bangladesh during COVID-19 pandemic: use of Google Map-based real-time traffic data", *SSRN Electronic Journal*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3638853>.

- [32] J. Zhao, Y. Guo, y X. Duan, "Dynamic path planning of emergency vehicles based on travel time prediction", *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2017, pp. 1–14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/9184891>.
- [33] X. Yang, S. Luo, K. Gao *et al.*, "Application of data science technologies in intelligent prediction of traffic congestion", *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2019, pp. 1–14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2915369>.
- [34] K. Hamad, y S. Kikuchi, "Developing a measure of traffic congestion: fuzzy inference approach", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1802, n.º 1, pp. 77–85, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3141/1802-10>.
- [35] M. Vaziri, "Development of highway congestion index with fuzzy set models", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1802, n.º 1, pp. 16–22, 2002. DOI: <https://doi.org/10.3141/1802-03>.
- [36] F. He, X. Yan, Y. Liu *et al.*, "A traffic congestion assessment method for urban road networks based on speed performance index", *Procedia Engineering*, vol. 137, pp. 425–433, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.277>.
- [37] J. Tang, y H. R. Heinemann, "A resilience-oriented approach for quantitatively assessing recurrent spatial-temporal congestion on urban roads", *PLOS ONE*, vol. 13, n.º 1, e0190616, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190616>.
- [38] W.-X. Wang, R.-J. Guo, y J. Yu, "Research on road traffic congestion index based on comprehensive parameters: taking Dalian city as an example", *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 10, n.º 6, p. 168781401878148, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814018781482>.
- [39] J. Mahona, C. Mhilu, J. Kihedu *et al.*, "Factors contributing to traffic flow congestion in heterogeneous traffic conditions", *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, vol. 9, n.º 2, pp. 238–254, 2019. DOI: [https://doi.org/10.7708/ijtte.2019.9\(2\).09](https://doi.org/10.7708/ijtte.2019.9(2).09).
- [40] Y. Han, y Y. Kim, "Spatiotemporal congestion recognition index to evaluate performance under oversaturated conditions", *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 23, n.º 8, pp. 3714–3723, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-019-2232-2>.
- [41] S. R. Samal, P. Gireesh Kumar, J. Cyril Santhosh *et al.*, "Analysis of traffic congestion impacts of urban road network under Indian condition", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1006, n.º 1, p. 012002, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1006/1/012002>.

- [42] N. Zafar, y I. Ul Haq, "Traffic congestion prediction based on estimated time of arrival", *PLOS ONE*, vol. 15, n.º 12, p. e0238200, 2020. DOI: 10.1371/journal.pone.0238200.
- [43] T. Afrin, y N. Yodo, "A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system", *Sustainability*, vol. 12, n.º 11, p. 4660, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12114660>.
- [44] Departamento Administrativo de la Función Pública, *Guía para la construcción y análisis de Indicadores de Gestión*, Bogotá, Colombia, 2015.
- [45] L. A. Rodríguez-Villamizar, Y. Rojas, S. Grisales *et al.*, "Intra-urban variability of long-term exposure to PM2. 5 and NO2 in five cities in Colombia", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 31, n.º 2, pp. 3207-3221, 2024.0 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31306-w>.
- [46] J. Cáceres, Aplicativo para la extracción de velocidades de tráfico en zonas urbanas. Bucaramanga: Grupo de investigación Geomática, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, 2021.
- [47] M. W. Ei Leen, N. H. A. Jafry, N. M. Salleh *et al.*, "Mitigating traffic congestion in smart and sustainable cities using machine learning: a review", en, *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2023. ICCSA 2023. Lecture Notes in Computer Science*, O. Gervasi *et al.* eds., vol. 13957, Cham, Suiza: Springer Nature, 2023, pp. 321–331. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36808-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36808-0_21).
- [48] Universidad Industrial de Santander y Municipio de Bucaramanga, *Plan Maestro de Movilidad, Bucaramanga 2010–2030*, Bucaramanga, Colombia, 2011.
- [49] Dirección de Tránsito de Bucaramanga. (s. f.). "Parque automotor-DTB". [Internet]. Disponible en <http://transitobucaramanga.gov.co/dtb/atencion-y-servicios-a-la-ciudadania/movilidad/parque-automotor/>
- [50] Data Commons. (s. f.). "Earth - Place Explorer". [Internet]. Disponible en [https://datacommons.org/place/Earth?utm\\_medium=explore&mprop=count&popt=Person&hl=es](https://datacommons.org/place/Earth?utm_medium=explore&mprop=count&popt=Person&hl=es)

