

**IMPLEMENTACIÓN DE PEAJE URBANO EN LOS VIADUCTOS GARCÍA CADENA,
LA FLORA Y EL PUENTE DE LA NOVENA EN BUCARAMANGA USANDO
SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE**

**EINNER ABEL MORALES GÓMEZ
WILLIAM SEBASTIAN NIETO GONZALEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2022**

**IMPLEMENTACIÓN DE PEAJE URBANO EN LOS VIADUCTOS GARCÍA CADENA,
LA FLORA Y EL PUENTE DE LA NOVENA EN BUCARAMANGA USANDO
SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE**

**EINNER ABEL MORALES GÓMEZ
WILLIAM SEBASTIAN NIETO GONZALEZ**

Trabajo de grado para optar título de Ingeniero Civil

Director

MILLER SALAS RONDON

Doctor en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA**

2022

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	12
1. OBJETIVOS	15
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES	16
2.2. EXPERIENCIA NACIONAL.....	20
2.3. LA POLÍTICA DE COBROS POR CONGESTIÓN	26
2.4. RAZONES DE LAS TARIFAS DE COBRO A LA CIRCULACIÓN VEHICULAR	27
2.5. FORMAS DE CONTROLAR LA CONGESTIÓN MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TARIFAS.....	28
2.6. ACEPTACIÓN DE LA MEDIDA.....	29
2.7. ESTIMACIÓN DE COSTOS.....	30
2.7.1. Costos directos.	31
2.7.2. Costos indirectos.....	31
2.8. TECNOLOGÍA PARA EL COBRO.....	34
2.8.1 Tecnología DSRC o RFID “sistema de comunicación vehicular”:	35
2.8.2. Cobro de peaje por video (ANPR):	35
2.9. TECNOLOGÍAS NUEVAS PARA EL COBRO	36
2.9.1. Sistema de peaje mediante odómetro	36
2.9.2. Sistema de peaje mediante telefonía móvil	36
2.9.3. Sistemas de peaje basados en tecnología GPS	37
2.9.4. Peaje en Flujo Libre	37

2.10. INVESTIGACIONES DE PEAJES URBANOS EN COLOMBIA	39
2.11. VÍAS ALTERNATIVAS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO	39
3. RECOPIACION DE DATOS	40
3.1. ESTIMACIÓN DEL COSTO GENERALIZADO	42
3.2. ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO MEDIO USUARIO CME (Q)	42
3.3. ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO MARGINAL SOCIAL CMA (Q)	43
4. ANÁLISIS SEGÚN ZONA DE ESTUDIO	44
4.1. ANÁLISIS VIADUCTO GARCÍA CADENA	44
4.1.1. Función Flujo-Demora del Viaducto García Cadena	44
4.1.2. Función CMe del Viaducto García Cadena	44
4.1.3. Función CMA del Viaducto García Cadena	45
4.1.4. Función de demanda del Viaducto García Cadena	45
4.2. ANÁLISIS VIADUCTO LA FLORA	46
4.2.1. Función de Flujo-Demora del Viaducto la Flora	46
4.2.2. Función CMe del Viaducto la Flora	46
4.2.3. Función CMA del Viaducto la Flora:	47
4.2.4. Función de demanda del Viaducto la Flora	47
4.3. ANÁLISIS VIADUCTO LA NOVENA	48
4.3.1. Función de Flujo-Demora del Puente la Novena	48
4.3.2. Función CMe del Puente la Novena	48
4.3.3. Función CMA del Puente la Novena:	49
4.3.4. Función de demanda del Puente la Novena	49
5. RESULTADOS	50
6. CONCLUSIONES	54

7. RECOMENDACIONES	56
BIBLIOGRAFIA	57
ANEXOS	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución por tipo de vehículo en el Área Metropolitana de Bucaramanga. .23	
Tabla 2. Cobro por congestión sistemas basado en equipo intra vehiculares.35	
Tabla 3. Cobro por congestión sistemas electrónicos.36	
Tabla 4. Escenario con cobro por congestión para los viaductos analizados.50	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Peaje urbano en Singapur.	17
Figura 2. Delimitación del peaje urbano de Londres.	19
Figura 3. Parque automotor-Población en el Área Metropolitana de Bucaramanga.	22
Figura 4. Modo de transporte en el Área Metropolitana de Bucaramanga.	24
Figura 5. Viaducto La Flora.	41
Figura 6. Puente La Novena.	41
Figura 7. Comparación del flujo con la implementación de la media en el Viaducto García Cadena.	51
Figura 8. Comparación del flujo con la implementación de la media en el Viaducto García Cadena.	52
Figura 9. Comparación del flujo con la implementación de la media en el Puente La Novena.	53

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Esquema típico de cargo por congestión.	34
Gráfica 2. Función flujo demora para el arco Bucaramanga-Floridablanca, García Cadena.	44
Gráfica 3. Tarifa basada en costos marginales de congestión para el García Cadena.	45
Gráfica 4. Función flujo demora para La Flora.	46
Gráfica 5. Tarifa basada en costos marginales de congestión para La Flora.	47
Gráfica 6. Función flujo demora para el arco del puente La Novena.	48
Gráfica 7. Tarifa basada en costos marginales de congestión para La Novena.	49

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Vías alternas al viaducto García Cadena	62
Anexo B. Vías alternas al viaducto La Flora	63
Anexo C. Vías alternas al puente La Novena	64
Anexo D. Flujo vehicular, Viaducto La Flora sentido Bucaramanga-Floridablanca	66
Anexo E. Flujo vehicular, Viaducto La Flora sentido Floridablanca-Bucaramanga.....	67
Anexo F. Flujo vehicular, Puente La Novena sentido Bucaramanga-Floridablanca	68
Anexo G. Flujo vehicular, Puente La Novena sentido Bucaramanga-Floridablanca.....	69
Anexo H. Flujo vehicular, Viaducto García Cadena sentido Bucaramanga-Floridablanca.	70
Anexo I. Flujo vehicular, Viaducto García Cadena sentido Bucaramanga-Floridablanca	71
Anexo J. Escenario actual sin cobro para el Viaducto La Flora	72
Anexo K. Escenario actual sin cobro para el Puente La Novena	73

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE PEAJE URBANO EN LOS VIADUCTOS GARCÍA CADENA, LA FLORA Y EL PUENTE DE LA NOVENA EN BUCARAMANGA USANDO SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE*

AUTOR: EINNER ABEL MORALES GÓMEZ, WILLIAM SEBASTIAN NIETO GONZALEZ**

PALABRAS CLAVE: CONGESTIÓN, MOVILIDAD, ALTERNATIVA, PEAJE, IMPLEMENTACIÓN.

DESCRIPCIÓN:

En el presente estudio se presenta el análisis de la implementación de peajes urbanos ubicados en el viaducto García Cadena, La Flora, y el puente la Novena en el área metropolitana de Bucaramanga, utilizando sistemas inteligentes de transporte (ITS) como medio de recaudo. Esto como medida alternativa para dar solución a los problemas de congestión, al reducir los tiempos de viaje, y como fuente de financiamiento para el transporte público y su malla vial.

Para alcanzar los objetivos propuestos se llevó a cabo una revisión de la tecnología existente y una revisión de las experiencias internacionales para un sistema de cobro por congestión. Se realizaron aforos vehiculares para conocer los flujos, capacidad y composición vehicular que llegan a transitar por los diferentes viaductos, posteriormente el análisis y estimación de los costos por congestión mediante la teoría del costo marginal y una simulación del tráfico en cada uno de los tres puntos analizados para el Área Metropolitana de Bucaramanga, donde se realizó una comparativa del flujo vehicular de antes y después de la implementación de los peajes urbanos. Una vez realizado el análisis se obtuvo una tarifa óptima para el viaducto García Cadena, La Flor y La Novena de \$7900, \$5600 y \$3500 COP respectivamente, y una tarifa optima unificada de \$5700 para el Área Metropolitana de Bucaramanga, con el que se estima los ingresos que podría genera esta medida.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Miller Salas Rondón. Doctor en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte.

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF URBAN TOLLS IN THE GARCÍA CADENA VIADUCT, LA FLORA AND THE NOVENA BRIDGE IN BUCARAMANGA USING INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*

AUTHOR: EINNER ABEL MORALES GÓMEZ, WILLIAM SEBASTIAN NIETO GONZALEZ**

KEY WORDS: Congestion, Mobility, Alternative, Toll, Implementation

DESCRIPTION:

This study presents the analysis of the implementation of urban tolls located in the García Cadena viaduct, La Flora, and the Novena bridge in the metropolitan area of Bucaramanga, using intelligent transportation systems (ITS) as a means of collection. This as an alternative measure to solve congestion problems, by reducing travel times, and as a source of financing for public transport and its road network.

To achieve the proposed objectives, a review of existing technology and a review of international experiences for a congestion charging system were carried out. Vehicle gauging was carried out to know the flows, capacity and vehicle composition that come to travel through the different viaducts, later the analysis and estimation of congestion costs through the marginal cost theory and a traffic simulation in each of the three points. analyzed for the Metropolitan Area of Bucaramanga, where a comparison of the vehicular flow was made before and after the implementation of urban tolls. Once the analysis was carried out, an optimal rate was obtained for the García Cadena, La Flor and La Novena viaduct of \$7,900, \$5,600 and \$3,500 COP respectively, and an optimal unified rate of \$5,700 for the Metropolitan Area of Bucaramanga, with which the income that could be generated by this measure.

* Degree work

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Miller Salas Rondón. Doctor en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte.

INTRODUCCIÓN

La congestión de tránsito debido al incremento acelerado del parque automotor es una problemática presente en gran parte del mundo, donde se ve reflejado en mayores tiempos de viaje, pérdida de producción de los ciudadanos y afectación en la calidad de vida. La mayoría de los costos de la congestión del tráfico los asumen los viajeros colectivamente, pero, debido a que estos imponen demoras a otros, no pagan el costo social marginal completo de sus viajes, creando una externalidad negativa¹

Con el fin de mitigar el impacto de la congestión, la ciudad de Bogotá optó por implementar una política de restricción a la circulación conocida como “pico y placa”. A causa del aparente éxito de esta medida, al menos en su etapa inicial, se extendió a otras ciudades de Colombia, como Medellín, Cali, Bucaramanga, Cúcuta, Pereira y Cartagena. Si bien la evidencia empírica muestra que en Bogotá y Medellín esta medida solo ha tenido un impacto positivo en el corto plazo, mostrando que a mediano y largo plazo han aumentado las cifras de nuevos vehículos matriculados y el uso del vehículo particular⁰, pues se incentiva la compra de un segundo vehículo para circular los días que el otro no puede, con lo cual resurgen los problemas de movilidad, siendo el “pico y placa” una medida regresiva, que se termina imponiendo sobre todo a la población con menores ingresos. Algunas ciudades del país han empezado a estudiar la posibilidad eliminar esta restricción a la circulación y remplazarla por una política de cobros por congestión².

Ante esto, la mayoría de los especialistas en el campo están de acuerdo en que la tarificación vial representa el camino a seguir para abordar los impactos negativos del transporte, pues se cobra a los conductores de manera que puedan percibir los costos marginales asociados con sus decisiones de conducción³.

¹ A. De Palma & R. Lindsey, “Traffic congestion pricing methodologies and technologies”. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, no.6, pp. 1377-1399. 2011.

² RAMOS Guerrero, R. Cobros por congestión como alternativa al “pico y placa” en las ciudades colombianas: Caso Medellín. [Tesis de maestría]. Barranquilla, Universidad del Norte, 2015.

³ J. GRISOLÍA, F. Lopez & J. Ortúzar. “Increasing the acceptability of a congestion charging scheme”. *Transport Policy*. Vol. 39. Pp. 37-47. 2015.

Ahora bien, enfocados en el Área Metropolitana de Bucaramanga, el comportamiento del tráfico desde el año 2012 muestra que el sector comprendido entre la ciudad de Floridablanca y Bucaramanga, más exactamente el viaducto García Cadena, es una de las zonas más neurálgicas del AMB en las horas punta⁴.

Debido al incremento de vehículos en el Área Metropolitana de Bucaramanga se tiene disposición de velocidades muy bajas lo cual hace que la congestión aumente ocasionando atascos que conllevan a mayores tiempos de viaje. Según estudios de movilidad urbana realizados por el AMB, se observó que, si bien la demanda de viajes puede crecer más que la población, en la hora pico su crecimiento será del orden de 0,79% anual, pasando de 112.000 viajes en el año 2021 a más de 127.000 en el año 2037⁵.

Es por lo anteriormente enunciado que el presente proyecto pretende cuantificar los costos de la congestión vehicular que se presentan diariamente en los viaductos García Cadena, La Flora y el viaducto de La Novena en Bucaramanga, y los ingresos que se obtendrían al aplicar el cobro por congestión para los puntos analizados. Esto usando sistemas inteligentes de transporte, para lo cual se pretende revisar la tecnología existente que emplean los Sistemas Inteligentes de Transporte para el cobro del peaje, definir vías alternativas para aquellos usuarios que no deseen pagar el valor del peaje, realizar un modelamiento simulando el tráfico con la implementación de esta medida y revisar las experiencias de otras ciudades del mundo que han implementado esta medida para reducir la congestión. Entre estas ciudades está Londres que logró reducir la congestión cerca del 30% dentro del área acordada, Singapur y Estocolmo. La meta está en encontrar una alternativa suplementaria a la construcción de infraestructura vial, y al pico y placa, de la cual se obtengan resultados a corto, mediano y largo plazo. También

⁴ J. JIMÉNEZ Serpa & M. Salas Rondón. “Aplicación de Modelos Econométricos para Estimar la Aceptabilidad de una Tasa por Congestión Vehicular”, INGE CUC, vol. 13, no. 2, pp. 60-78, 2017.

⁵ UNION Temporal Transconsulta-PROFIT. “Visión del Plan y Objetivos del PMMM del AMB”. consultoría para la actualización del plan maestro metropolitano de movilidad (PMMM) del Área Metropolitana de Bucaramanga. 2022.

se revisó las experiencias de ciudades como Bogotá y Medellín donde se han realizado estudios para la implementación de un sistema de peajes urbanos.

Adicionalmente se analizaron los impactos sociales de esta nueva alternativa, sin olvidar que punto esencial es el nivel de congestión, pues cuanto más se encuentre saturada una zona, mayores ganancias se percibirán si dicha congestión se puede reducir por la regulación propuesta, por lo cual los resultados no pueden ser transferibles ya que la estructura urbana y el nivel de congestión varían de un sitio a otro⁶. Es por ello que se hace pertinente estudiar la implementación del cobro por congestión para cada una de las zonas claves del AMB, los viaductos de La Flora, García Cadena y el puente de la Novena, como una de las mejores alternativas ante el problema de la congestión.

⁶ GUZMAN García, L. “Los Costes de la Congestión Urbana. Estimación de Cambios en el Bienestar Derivados de la Implementación de un Cobro por Congestión”. IX Congreso de Ingeniería de Transporte. Madrid, 2010.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el valor del peaje urbano a ubicarse en los viaductos de la Flora, García Cadena y viaducto de la Novena en Bucaramanga, empleando la teoría del costo marginal.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar los costos de la congestión vehicular que se presenta diariamente en los viaductos de la Flora, García Cadena y el viaducto de la novena en Bucaramanga.
- Cuantificar los ingresos que se obtendrían por concepto de aplicar el cobro por congestión en los tres viaductos si para el recaudo se emplea un Sistema Inteligente de Transporte.
- Revisar la tecnología existente que emplean los Sistemas Inteligentes de Transporte para el cobro del peaje sin necesidad de que los vehículos se detengan.
- Revisar las experiencias de otras ciudades del mundo que han implementado esta medida para reducir la congestión.
- Definir vías alternativas para aquellos usuarios que no deseen pagar el valor del peaje.
- Realizar un modelamiento simulando el tráfico implementando esta medida, con la ayuda de herramientas de micro simulación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

La oportunidad de mejorar la sostenibilidad del transporte en las grandes ciudades requiere de una medida contributiva pues se hace necesario implementar los sistemas de peajes urbanos para generar la reducción significativa del uso del automóvil, incentivando un aumento considerable en el uso del transporte masivo y promoviendo alternativas sostenibles como el uso de la bicicleta, desplazamiento a pie a los distintos destinos, y una elevada disminución de la congestión urbana en el sector de implementación y su entorno⁷.

La experiencia internacional en el diseño y aplicación de peajes urbanos data del 1975 cuando se inauguró el sistema de Singapur, el cual cuenta actualmente con cerca de una decena de ejemplos en funcionamiento⁸.

El sistema de cobro por congestión de Singapur es uno de los más tradicionales iniciando su operación en el año 1975, estableciendo como medidas la imposición de impuestos aplicados a la propiedad del vehículo, elevados gravámenes sobre el combustible y cobros por estacionamiento, el objetivo principal de dichas medidas se basó en la disminución de los altos niveles de congestión vehicular que soportaba la ciudad. A su vez proporcionar una gran cantidad de ingresos públicos con la finalidad de generar una estrategia importante de transporte en la planificación bien concebida teniendo en cuenta variables como el uso del suelo, optimización de la red de infraestructura vial y un mejoramiento de la gestión para la integración del tráfico, y lograr implementar un modelo de infraestructura vial sostenible en la ciudad⁹.

⁷ J. MUÑOZ & F. Anguita, "Los peajes urbanos como factor determinante de sostenibilidad y competitividad en el transporte urbano: Un estudio aplicado a Madrid". *Eure*, vol. 44, no. 131, pp. 53-74. 2018.

⁸ E. POZUETA, "La experiencia Internacional en peajes urbanos", Instituto Juan de Herrera. Madrid, España: Faster, 2008.

⁹ DIAZ López, Y. & Sanguino Páez, G. Propuesta de una tipología adecuada de peaje urbano para el centro ampliado de la ciudad de Bogotá. [Tesis de maestría]. Bogotá. Universidad Santo Tomás. 2021.

El cordón del peaje urbano de Singapur se destaca por tener un ámbito de aplicación de 7.2 Km2, involucrando al centro de la ciudad por ser esta ubicación estratégica por el desarrollo económico y social de la misma, por lo tanto genera una alta concentración de tráfico vehicular, presenta 44 puntos de control mediante dispositivos ERP interno del vehículo, y una jornada de operación continua entre las 7:30 y las 18:30 horas todos los días laborales, y entre las 10:15 y las 14: 00 horas los sábados como alternativa de disminución de la congestión por motivos de tipo comercial¹⁰.

El sistema de cobro del peaje de Singapur anteriormente se realizaba con una tarjeta que debía estar adherida al parabrisas del vehículo, a medida que se desarrollaron los avances tecnológicos se implantó un sistema electrónico mediante Tag y cámaras de identificación de vehículos evasores. El cobro por congestión se realiza en una zona específica, en donde los vehículos que no cuenten con esta tecnología van e identifican las placas por medio de dos cámaras instaladas en el punto y así mismo se les notifica la respectiva multa por falta de implementación de los dispositivos¹¹.

Figura 1. Peaje urbano en Singapur.



Fuente: Diaz López, Y. & Sanguino Páez, G. Propuesta de una tipología adecuada de peaje urbano para el centro ampliado de la ciudad de Bogotá. [Tesis de maestría]. Bogotá. Universidad Santo Tomás. 2021¹².

¹⁰ E. POZUETA. Op. Cit., p. 11.

¹¹ DIAZ. Op. Cit., p. 12.

¹² DIAZ. Op. Cit., p. 12.

Tras su implementación en Singapur, hubo una reducción del 73% tráfico entrante en la zona, aumento de la velocidad media de 19 a 36 km/h donde eran resultados por encima de lo esperado, ya en 1992 el tráfico entrante era aproximadamente el 50% del de 1975, y el transporte público subió del 37 al 67% en los viajes al trabajo¹³.

Otra experiencia internacional se encuentra en la ciudad de Madrid, donde se realizó un análisis del impacto que tendría implementar una tarifa por congestión o contaminación en dicha ciudad, enfocándose principalmente en el impacto a medio y largo plazo sobre la movilidad y la contaminación de la ciudad. El estudio se hizo utilizando el software Vissim y se estimó la tarifa de peaje óptima para reducir un 50% las toneladas de CO2 emitidas en Madrid y la reducción del uso del vehículo privado en un 10% para el año horizonte. Como resultado del análisis, se obtuvo que las emisiones de CO2 y el uso del auto privado en el centro de Madrid con la implementación del cobro por congestión serían del 34% y 10% respectivamente¹⁴.

También existe el caso de Londres que desde el año 2003 cuenta con un cobro por congestión en su zona centro, el esquema londinense se basa en un área de cobro delimitada y controlada por un cordón de 21 km² y reforzada por un sistema de cámaras (ALPR). El cobro es aplicado de lunes a viernes desde las 7am-6:00pm por ingresar al área tarifada. El valor por día en el año 2003 era de £5 y actualmente es de £10 con un desincentivo de pago doble después de las 10pm, las excepciones de pago son hechas para las personas discapacitadas, motos, vehículos de NHS, otros vehículos (registrados), buses, vehículos de emergencia y personas de bajos ingresos. Es importante notar que antes de implementar el programa se aumentó el servicio de buses, se redujo el costo de los viajes en el transporte público, se mejoraron las conexiones entre buses y trenes y se invirtió en información de horarios de buses.0 Uno de los objetivos fundamentales del proyecto fue reducir el tráfico en el centro de la ciudad

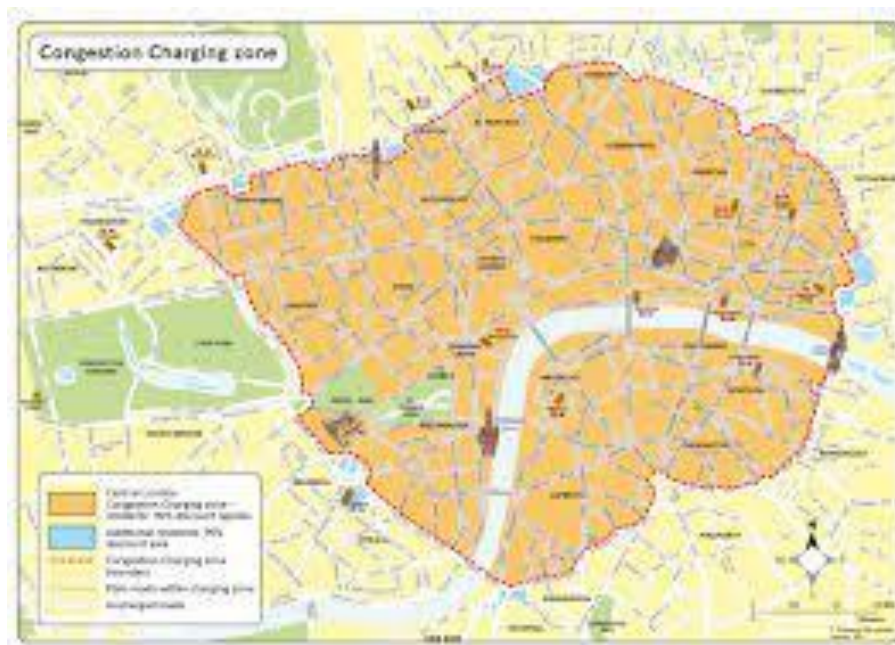
¹³ E. POZUETA. Op. Cit., p. 11.

¹⁴ BERNAL Botero, M. & Zuluaga Arango, M. Determinación de la tarifa para un esquema de cobro de congestión para los corredores principales del centro de Medellín. [Tesis de pregrado]. Envigado, Universidad EIA, 2019.

disminuyendo las demoras en las vías, incrementar la velocidad de marcha dentro de la zona, se mejoraron a su vez las condiciones alrededor de la zona y las operaciones del transporte público¹⁵.

El sistema tecnológico utilizado consta de cámaras de reconocimiento automático de las placas vehiculares, ubicadas en las entradas de la zona donde inicia el peaje, dicho sistema capta la información a una velocidad de una placa por segundo en vehículos que alcanzan una velocidad de hasta 160 Km/h, garantizando los mínimos niveles de evasión. Aquellos vehículos que no realizan el pago son remitidos sus datos a la autoridad competente quien hará efectivo los respectivos comparendos¹⁶.

Figura 2. Delimitación del peaje urbano de Londres.



Fuente: “Catalizadores del cambio urbano (7) peaje urbano en Londres”, Metrhispanico.com, Londres, 2015. <https://metrhispanico.com/tag/londres/>¹⁷

¹⁵ UNIVERSITY COLLEGE LONDON-Universidad de los Andes. *Cobros de congestión en ciudades colombianas*. 2003.

¹⁶ I. GRANADA. “El peaje a congestión en Londres: Su aporte a la movilidad sostenible”. *Revista de ingeniería Universidad de los Andes-Bogotá*, no. 29, pp. 137-147. 2009.

¹⁷ “CATALIZADORES del cambio urbano (7) peaje urbano en Londres”, Metrhispanico.com, Londres, 2015. <https://metrhispanico.com/tag/londres/>

Se logro una reducción de la congestión dentro del ámbito del 26% respecto al año 2002, una reducción del tráfico entrante del 21%, aumento de los viajes del transporte público del 20%. El efecto combinado del sistema y de las mejoras tecnológicas han reducido las emisiones de NOx en un 15% y de PM10 en un 15% y un aumento de la velocidad media en el ámbito de 26 km/h en el 2002, a 33 km/h en el 200%¹⁸.

En Edimburgo, Escocia, se presentó una iniciativa de implementación de peajes por congestión. El esquema propuesto presentaba variantes al caso de Londres en términos de política integral y tipo de esquema de tarificación. El esquema propuesto estaba compuesto por un doble cordón concéntrico alrededor del centro financiero de la ciudad. El sistema consideraba una tarifa de £2,0 que se pagaría de manera diaria y funcionaria de 7AM a 7PM. Inicialmente se esperaba que se iniciara su operación desde el año 2006¹⁹.

La implementación de este sistema estaba ligada a ciertas medidas complementarias como mejoras en transporte público, estacionamientos Park and Ride, medidas de mitigación de impactos negativos a la zona con cobro. Todas estas medidas tenían un costo cercano a los £770 millones, compartido entre Edimburgo y las autoridades locales vecinas.

2.2. EXPERIENCIA NACIONAL

En las ciudades latinoamericanas, la evolución de los ingresos de los residentes y de los precios de los automóviles, particularmente de los usados, hace que la propiedad de un vehículo esté dejando de ser un sueño inalcanzable y se transforme en un hecho consumado para muchas familias. El aumento de la tasa de motorización es un fenómeno

¹⁸ E. POZUETA. Op. Cit., p. 11.

¹⁹ UNIVERSITY COLLEGE. Op. Cit., p. 14.

que se repite en casi toda América Latina y ha permitido, especialmente a la clase media, cosechar uno de los frutos más importantes del avance tecnológico del siglo XX²⁰.

Una característica que agrava la congestión en América Latina es la marcada preferencia de las personas por usar el automóvil, donde las personas, antes las diferentes medidas que se han tomado para combatir los problemas de congestión, como el pico y placa, han adquirido vehículos adicionales para eludir los efectos de la medida, prefiriendo muchos soportar la congestión, antes que utilizar el transporte público²¹.

Entrando en el área de estudio de este artículo, las estadísticas señalan que el parque automotor en el área metropolitana de Bucaramanga, en la conurbación en 2011 era de 307 mil vehículos, y 2020 cerró con 760 mil. Es decir, en la última década se registró un incremento de 453 mil automotores, aumento que equivale al 147% y entre 2020, donde hasta junio del 2021 en Santander se registraron cerca de ocho mil nuevos automotores. Según estadísticas del Gobierno Nacional, en el 2020 se matricularon 3.402 vehículos en el departamento, y en el 2021 con corte hasta junio del mismo año, se contabilizaron 4.597 registros nuevos²².

En la figura 3, se puede apreciar el crecimiento del parque automotor en el Área Metropolitana de Bucaramanga del 2011 hasta el 2020, por otro lado, en la figura 2 se puede observar la distribución de cada tipo de vehículo dentro del AMB, siendo Bucaramanga el municipio que sufre la mayor parte de los impactos ocasionados por esta gran cantidad de motocicletas y automóviles. Según la Dirección de Tránsito Local, se calcula que el 70% de estos 760 mil vehículos confluyen en vías de la capital santandereana.

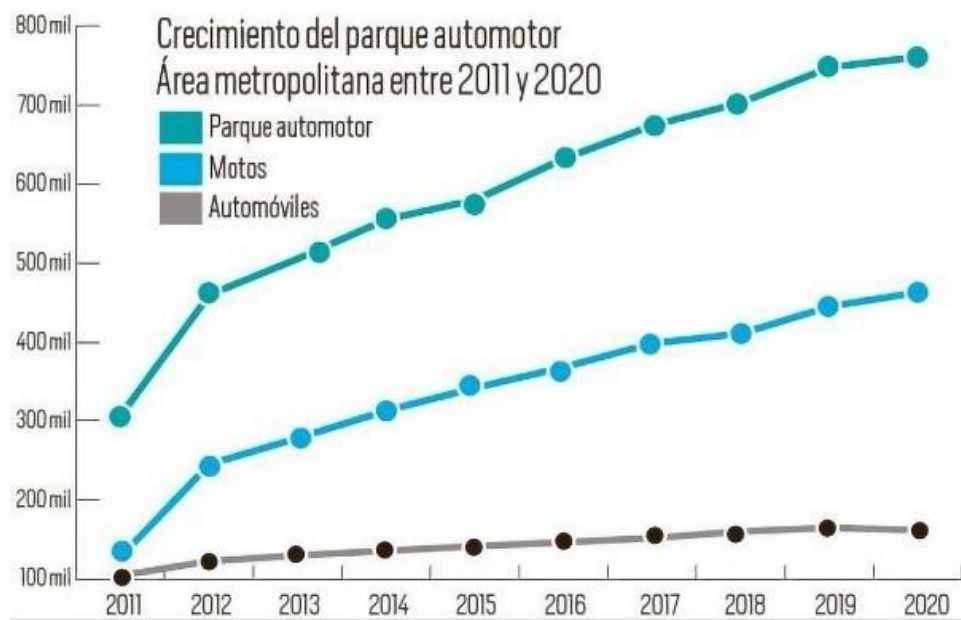
²⁰ A. BULL, "Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo", CEPAL, Santiago de Chile, 2003, p. 194.

²¹ Ibid., p.16.

²² J. PINEDA, "147% aumentó en Bucaramanga y su área el parque automotor", Bucaramanga: Vanguardia.com,2021. <https://www.vanguardia.com/area-metro-politana/bucaramanga/147-aumento-en-bucaramanga-y-su-area-el-parque-automotor-CX4088712>

Siendo la motocicleta en Latinoamérica un vehículo en alto crecimiento que contribuye a este fenómeno, incrementando las externalidades negativas del transporte. En Colombia se pasó de tener 2,6 millones de motos registradas en 2009 (45% del parque automotor), a 8,6 millones de motos en 2019 (58% del parque automotor), lo que representa un crecimiento de más del 200%.

Figura 3. Parque automotor-Población en el Área Metropolitana de Bucaramanga.



Fuente: J. Pineda, “147% aumentó en Bucaramanga y su área el parque automotor”, Bucaramanga: Vanguardia.com,2021. <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/147-aumento-en-bucaramanga-y-su-area-el-parque-automotor-CX4088712> :0

Tabla 1. Distribución por tipo de vehículo en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

Parque automotor – población			
Área metropolitana de Bucaramanga 2021			
Municipio	Población	Total vehículos	Número de personas por vehículo
Bucaramanga	614.269	217.682	2,8
Floridablanca	311.365	172.887	1,8
Girón	173.841	351.735	0,5
Piedecuesta	185.020	18.442	10
Total	1.284.495	760.746	

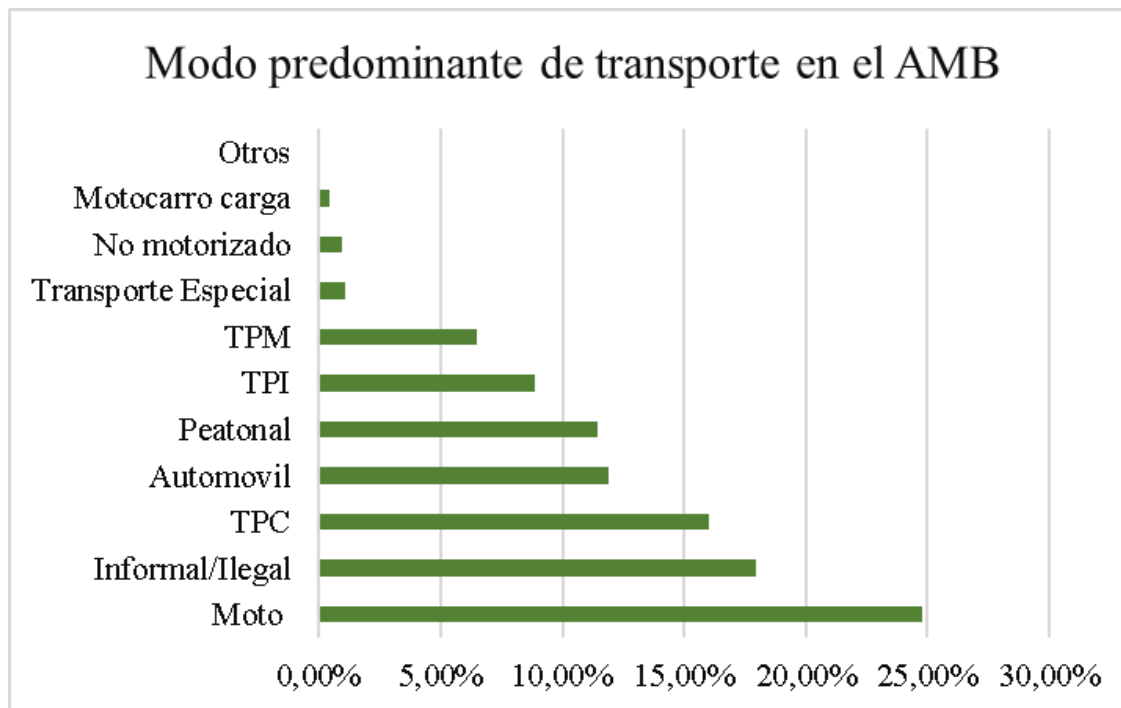
Fuente: J. Pineda, “147% aumentó en Bucaramanga y su área el parque automotor”, Bucaramanga: Vanguardia.com,2021. <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/147-aumento-en-bucaramanga-y-su-area-el-parque-automotor-CX4088712> 0

Ya que este porcentaje seguirá creciendo debido a que el uso de este vehículo les da sensación de tranquilidad, también es relevante que por el tamaño de ellas es posible evitar la congestión, y es un transporte muy económico los ciudadanos optan por este medio de transporte y es por ello que surge la necesidad de regular este crecimiento.

Con base en la información recolectada de la Encuesta Origen-Destino en lo referente al módulo de viajes se obtuvo la caracterización espacial y temporal de los desplazamientos de la población, permitiendo discriminar el total de viajes día por los diferentes modos de transporte utilizados para cada uno de los municipios que hacen parte del Área metropolitana de Bucaramanga²³.

²³ UNION TEMPORAL TRANSCONSULTA-PROFIT. “Línea Base y Diagnostico”. consultoría para la actualización del plan maestro metropolitano de movilidad (PMMM) del Área Metropolitana de Bucaramanga. 2022.

Figura 4. Modo de transporte en el Área Metropolitana de Bucaramanga.



Fuente: Union Temporal Transconsulta-PROFIT. “Línea Base y Diagnostico”. consultoría para la actualización del plan maestro metropolitano de movilidad (PMMM) del Área Metropolitana de Bucaramanga. 2022²⁴.

En la figura 3 se presenta para cada uno de los municipios el comparativo de número de viajes por modo de transporte, donde es de resaltar la alta participación de los desplazamientos en motocicleta y en transporte informal e ilegal que tienen participaciones superiores a las registradas por los sistemas de transporte público.

Los sistemas de peaje urbano se presentan actualmente como un instrumento que, integrado con las estrategias de movilidad y transporte urbano, contribuyen de forma efectiva a la movilidad sostenible mediante la reducción del uso del vehículo propio, con efectos positivos sobre el cambio en el reparto modal a favor del transporte público en los desplazamientos habituales, a la vez que contribuyen notablemente a la mejora de las condiciones medioambientales y sociales en el ámbito de las grandes ciudades.

²⁴ Ibid., p. 19.

Los sistemas de cobro por congestión están asociados con teorías económicas; funcionan aplicando una tarifa de cobro a determinados conductores por circular con su vehículo en una zona específica y en cierto periodo de tiempo con el fin de reducir altos índices de congestión vehicular que previamente se presentan en dicha zona. En situación de congestión los usuarios del auto no son conscientes del costo social que generan a otros usuarios del transporte cuando ocasionan una reducción de velocidad y por ende aumentan el tiempo de viaje, entre otros efectos; para superar esto, surge la necesidad de un mecanismo donde cada conductor perciba este costo y a la vez pague por el hecho de imponer costos a otros usuarios. Este tipo de medidas hacen parte de una política de movilidad de una ciudad, que generalmente vienen acompañadas de forma simultánea por otras medidas, como el desarrollo del transporte no motorizado y promoción del transporte público²⁵.

Es por ello que La Universidad de Antioquia estudió desde la perspectiva económica la necesidad de implementar un peaje urbano en la ciudad de Medellín, teniendo en cuenta una tasa de congestión que maximice el bienestar social bajo este sistema. Este análisis con información obtenida de otras investigaciones y encuestas obtuvo la relación costo-beneficio, curvas de oferta y demanda para las zonas de Laureles y El Poblado. Después de analizar los resultados obtenidos se concluyó que es recomendable implementar un peaje por congestión en la ciudad pues el beneficio neto de la implementación de la medida resulta positivo²⁶.

Se ha visto que los cobros por congestión son una alternativa que ha sido exitosa en otras ciudades del mundo; en Singapur, por ejemplo, la reducción de autos en la zona de cobro fue de alrededor del 50%; en Londres y Estocolmo del 21% y 22%, respectivamente, y los cambios en la movilidad se manifestaron en el aumento de la velocidad media, con un 50% - 100% para Singapur; reducción del tiempo de viaje del

²⁵ SOLARTE Portilla, J. Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares. [Tesis de maestría]. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. 2015.

²⁶ BERNAL. Op. Cit., p. 14.

26% para Londres, y en Estocolmo la longitud de colas disminuyó en un 50%.⁰ El estudio de los sistemas de cobro por congestión debe involucrar el análisis de todos los aspectos en un contexto específico, característico del lugar donde se desea implementar. Impactos en el tráfico, estudios de demanda, zonas de restricción, horarios, tarifas, sistema de cobro, usuarios exentos, aceptación social, estado de la infraestructura vial, accesos y vías periféricas, desarrollo económico, nivel de ingresos, son sólo algunos temas que deben ser abordados para determinar la viabilidad de estos sistemas²⁷.

2.3. LA POLÍTICA DE COBROS POR CONGESTIÓN

La mayoría de los expertos están de acuerdo en que la tarificación es la política más adecuada para abordar los problemas asociados a las externalidades del transporte, debido a que gracias a ella los conductores perciben los costos sociales derivados de su comportamiento. Adicionalmente los ingresos provenientes de estos cobros pueden ser invertidos adecuadamente para mejorar el transporte público o para financiar proyectos de infraestructura²⁸.

Los cobros por congestión tienen una gran ventaja sobre otras políticas de gestión de la demanda de transporte como el “pico y placa”, ya que alienta a los viajeros a ajustar todos los aspectos de su comportamiento como: número de viajes, destino, modo, hora, ruta, etc. Así como decisiones a largo plazo como donde vivir, estudiar, trabajar y ubicar sus negocios²⁹.

A pesar de todas sus ventajas, desde la experiencia pionera en Singapur y los sistemas de Londres y Estocolmo, muy pocos esquemas de cobros por congestión han sido implementados, aun así, existen algunos casos como algunas autopistas en Estados Unidos y ciudades de Europa como: Veleta, Trondheim, Oslo, Bergen, Roma, Milán y

²⁷ E. POZUETA. Op. Cit., p. 11.

²⁸ RAMOS. Op. Cit., p. 8

²⁹ BERNAL. Op. Cit., p. 14

Durham. Aunque el número de casos de aplicación sigue siendo limitado, es notorio el incremento en el número de ciudades adoptando y/o tratando de evaluar los efectos de la tarificación por congestión (por ejemplo: Copenhague, Budapest, Gotehemburg, San Francisco, Santiago de Chile, Bogotá, Sídney y Yakarta). También se destaca la política de cobro vial en Holanda y las actuales discusiones sobre la introducción de cobros por congestión en Bélgica.

En la ciudad de Nueva York se propuso un esquema de cobro de tipo cordón el cual fue detenido por la legislatura del estado de Nueva York en abril de 2008³⁰.

2.4. RAZONES DE LAS TARIFAS DE COBRO A LA CIRCULACIÓN VEHICULAR

Diferentes estudios realizados por investigadores del tema permiten identificar los principales motivos por los cuales se justifica una tarifa de cobro a la circulación vehicular en ámbitos urbanos, donde resaltan las siguientes razones:

Primero, se puede considerar que la aplicación de la tarifa o peaje urbano queda justificada, siempre que la obtención de recursos financieros permita o bien una mejora y/o ampliación de carreteras en las proximidades del entorno urbano, o bien esté orientada hacia la mejora del transporte urbano, por lo que, en este sentido, parece que dichos recursos revierten nuevamente al conjunto de la población afectada en forma de beneficios sociales.

Segundo, el peaje urbano se constituye como la tarifa que recae sobre el usuario con el objetivo de interiorizar los costes externos o externalidades generados del uso del vehículo privado sobre dicho ámbito urbano, lo que justifica la necesidad de imponer una tarifa, la cual, bajo la concepción del denominado impuesto pigouviano, sirva para

³⁰ Ibid., p. 23.

compensar o corregir las externalidades negativas que cada individuo genera a la sociedad.

Por último, hay que destacar que, las limitaciones que tradicionalmente ha ofrecido la utilización de políticas basadas en un crecimiento de la oferta de infraestructuras, unidas a los discretos resultados que la aplicación de los usuales instrumentos de gestión de tráfico sobre una solución aceptable al problema de la congestión en las grandes ciudades, sirven de argumento determinante para justificar la implantación de un sistema de peaje urbano, hecho que ha quedado avalado por los resultados³¹.

2.5. FORMAS DE CONTROLAR LA CONGESTIÓN MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE TARIFAS

Unas de las estrategias para manejar la congestión son mediante el uso de tarifas las cuales tienen varias presentaciones. Las ciudades que las implementaron, las establecieron mediante alguna de las siguientes maneras:

Ejemplo 1:

Cordón o anillo alrededor de una zona: Se establece un anillo o cordón alrededor de la zona congestionada. Se cobra una tarifa para entrar y/o salir de la zona, por lo general la tarifa varía de acuerdo con la hora en que se circule, también puede cambiar según la zona por donde se pretenda circular.

Ejemplo 2:

Tarifa según zona de circulación: Existe un cargo por entrar y salir de la zona. Además, se cobra por transitar dentro de ella, es decir que, si una persona realiza un viaje con

³¹ SOLARTE. Op. Cit., p. 21

origen y destino dentro de la misma zona, debe pagar una tarifa, aunque no haya salido de la zona.

Ejemplo 3:

Tarifa variable en una cierta vía: La tarificación de una vía permite incentivar a realizar viajes fuera de la hora pico por dicha vía además de permitir recaudar recursos importantes.

Ejemplo 4:

Cargo según la distancia recorrida: En este caso se cobra la tarifa en base a la distancia recorrida dentro del área de restricción³².

2.6. ACEPTACIÓN DE LA MEDIDA

Quizás el principal problema para la implementación de políticas de cobro por congestión es la poca aceptación que estas tiene entre el público en general. Los usuarios de automóviles no están dispuestos a pagar lo que desde su perspectiva es un impuesto adicional por usar el automóvil, especialmente en países en donde la tenencia y los combustibles de estos vehículos ya cuentan con altas cargas tributarias.

Tras realizar una revisión de un número sustancial de estudios que analizan el tema de la aceptación de la medida sacando algunas conclusiones³³:

A. La oposición general a los cobros por congestión puede estar muchas veces basada en la falta de confianza en el uso de los recursos recaudados por parte de los gobiernos³⁴.

³² Ibid., p. 24.

³³ J. GRISOLÍA. Op. Cit., p. 9.

³⁴ J. KIM, J. Schmöcker & R. Noland. "Attitudes towards road pricing and environmental taxation among US and UK students". Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol.48, pp. 50-62.2013.

B. La precepción pública de los problemas relacionados al uso del automóvil y acerca de los beneficios de una medida de cobro por congestión aparece como un factor adicional en el análisis. Se espera que la aceptación de la política se incremente en la medida que la conciencia general de los efectos negativos del uso del auto aumenta, así como con la percepción de efectividad de la tarificación para resolver los problemas relacionados con el tráfico

C. Es más probable que las personas acepten un esquema de cobros por congestión cuando este es presentado como un paquete que incluya información clara acerca del destino final de los ingresos³⁵. Pues de esta forma el beneficio de la medida pueda ser observado claramente, por ejemplo, las inversiones en transporte público³⁶.

Los problemas de aceptabilidad son complejos: El usuario podrá considerar que en sus impuestos está pagando por el uso de las vías y que tiene derecho a ello. Es importante que la inversión de los excedentes sea visible y que el mensaje que se transmita sea el cobro por congestionar y contaminar y no por usar vías. Por lo tanto, es importante desarrollar campañas de sensibilización y participación de la comunidad para que entiendan el proyecto antes de que sea implementado³⁷.

2.7. ESTIMACIÓN DE COSTOS

Actualmente se cuenta con varias metodologías que nos permiten estimar los costos debidos a la congestión, desde métodos muy sencillos a supremamente complejos y detallados.

³⁵ D. ALBALATE & G. Bel. "What Local Policy Makers Should Know about Urban Road Charging: Lessons from Worldwide Experience". *Public Administration Review*, vol. 69, no.5, pp. 962-975. 2009.

³⁶ K. KOTTENHOFF & K. Brundell-Freij, K. "The role of public transport for feasibility and acceptability of congestion charging – The case of Stockholm". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol.43, no.3, pp. 297-305. 2009.

³⁷ UNIVERSITY COLLEGE LONDON. *Op. Cit.*, p. 27.

Uno de los métodos es mediante funciones de volumen demora o también conocidas como funciones de congestión, las cuales consideran el efecto de la capacidad vial sobre los tiempos de viaje. A partir del tiempo de viaje en la vía se puede calcular el costo marginal adicionándole al tiempo de viaje los tiempos impuestos a los demás usuarios del escenario cuando un nuevo vehículo ingresa al sistema³⁸.

Se tienen en cuanto 2 tipos de costos:

2.7.1. Costos directos. Son aquellos que repercuten directamente sobre los usuarios que están inmersas o participan en el flujo del tráfico. Sin embargo, solo se tienen en cuenta los costes que soportan directamente los ocupantes de los vehículos, es decir, que no se tendrán en cuenta los costes directos del transporte, debido a que muchos de ellos no varían al estar sometidos a un tráfico congestionado, como lo son los impuestos, costos de propiedad o seguros. Los costos que se tendrán en cuenta, ya que son los más relevantes son los siguientes: costos por el consumo de combustible, mantenimiento del vehículo, accidentalidad y por pérdidas de tiempo³⁹.

2.7.2. Costos indirectos. Son aquellos que no están inmersos dentro del flujo circulatorio congestionado. Como lo son los impactos al medio ambiente y a la salud de los seres vivos. Los más relevantes son los costos por la contaminación atmosférica, el cambio climático y de contaminación acústica. Adicionalmente se pueden tener en cuenta las pérdidas de tiempo de los empleados, cuyo peso suele recaer sobre las empresas⁴⁰. A partir de conocer los puntos de intersección las curvas marginales, individual y de demanda.

En un tipo de peaje de congestión pigouviano se tienen en cuenta para su estimación elementos como:

³⁸ SOLARTE. Op. Cit., p. 21.

³⁹ BERNAL. Op. Cit., p. 14.

⁴⁰ SOLARTE. Op. Cit., p. 21.

- La demanda

Hace referencia a la cantidad de individuos que desean utilizar determinada infraestructura.

- Valor del tiempo

Es el elemento que permite monetizar el tiempo empleado por los usuarios en transportarse, representa lo que un individuo está dispuesto a pagar por ahorrar tiempo de viaje y es igual a la tasa marginal de sustitución entre el tiempo de viaje y su costo monetario. Esta disposición a pagar se determina en función de las características socioeconómicas de los individuos, de tal manera que aquellos con mayores ingresos tienen mayor capacidad de pago, respecto a los individuos de menores ingresos, y, por lo tanto, están dispuestos a pagar más por ahorrarse un minuto de viaje. El valor del tiempo de los usuarios resulta ser una de las principales variables en el análisis de la congestión y sus costos⁴¹.

- Costo generalizado de transporte

Entre los componentes del costo en el que incurre un individuo al transportarse están los costos monetarios del viaje (tarifas, costos de combustible, mantenimiento del vehículo, etc.) y el costo del tiempo de viaje, el cual determina la conveniencia o utilidad de las diferentes alternativas entre los medios de transporte^{42 43}.

Para el cálculo de la estimación del costo generalizado se debe cuantificar el valor del tiempo, el cual se determina con la teoría microeconómica de modelos de elección discreta. Ahora, teniendo en cuenta las encuestas de preferencias declaradas para cuantificar el valor sujeto del tiempo (VST) realizadas por 0 para el Área Metropolitana de Bucaramanga, se calcula el tiempo de viaje. Dentro del proceso de asignación de tráfico

⁴¹ J. MUÑOZ. Op. Cit., p. 11.

⁴² J. MUÑOZ. Op. Cit., p. 11.

⁴³ K. KOTTENHOFF. Op. Cit., p. 26.

se utilizan las funciones flujo-demoras o de congestión, tal como la función del Bureau Public Roads (BPR, 1964), que en este caso se aplicaría según la ecuación (1)⁴⁴.

$$t_a^0(q_a^0) = t_a \left[1 + k \left(\frac{q_a^0}{c_a} \right)^\lambda \right] \quad (1)$$

t_a^0 y q_a^0 : corresponde al tiempo de viaje y flujo en el arco a ,

t_a : es el tiempo de viaje a flujo libre

c_a : es la capacidad práctica del arco a , la cual se determina empleando el Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril, INVIAS (2020)

k y λ : son parámetros del modelo que deben calibrarse, por lo general se adoptan los valores de $k = 0,15$ y $\lambda = 4$ (Sheffi, 1985)

- Costo individual/Costo social

Es el costo en el que cada usuario incurre para transportarse, incluyendo los efectos de agentes externos a su actividad (ej. Congestión), es el costo individual. Éste representa lo que cada miembro de la sociedad pierde por movilizarse por medio de la red de transporte. 0

Basado en la teoría del costo marginal se obtiene la siguiente ecuación (2)

$$CMa(V) = CMe(V) + \frac{\partial CMe(V)}{\partial V} \quad (2)$$

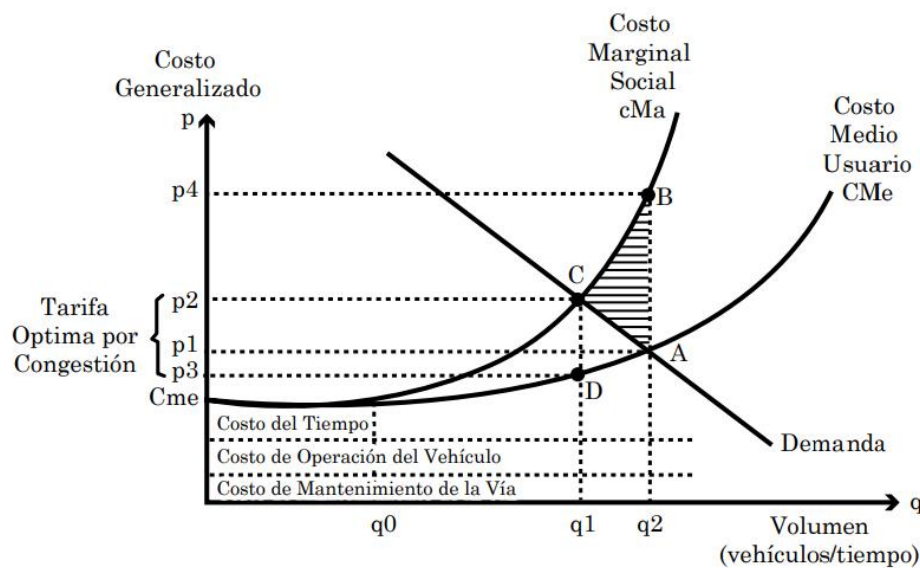
la curva $CMe(V)$ representa el costo medio o costo privado percibido por los conductores y la curva $CMa(V)$ representa el costo marginal o social, ambos costos están relacionados por la Ecuación (2), donde el segundo término de la derecha representa las externalidades, es decir que el costo marginal es el costo promedio más el costo de las externalidades⁴⁵.

⁴⁴ J. JIMÉNEZ. Op. Cit., p. 9.

⁴⁵ RAMOS. Op. Cit., p. 8

En la figura 3, se muestra el esquema tipo de tarificación por congestión, donde el punto C representa la situación en la cual los usuarios del sistema internalizan los costos por congestión, y lo hacen percibiendo p_2 que es mayor que lo que percibían en el equilibrio por costos medios del usuario p_1 . La diferencia entre p_2 y p_3 sería el cargo por congestión necesario para optimizar la asignación de recursos y, así, maximizar los beneficios que la sociedad tiene por la utilización de la infraestructura.⁴⁶

Gráfica 1. Esquema típico de cargo por congestión.



Fuente: . Jiménez Serpa & M. Salas Rondón. “Aplicación de Modelos Económicos para Estimar la Aceptabilidad de una Tasa por Congestión Vehicular”, INGE CUC, vol. 13, no. 2, pp. 60-78, 2017⁴⁷.

2.8. TECNOLOGÍA PARA EL COBRO

Las tecnologías utilizadas se fundamentan en la generación de un cobro electrónico (peajes ETC “Electronic Toll Collection”).

⁴⁶ J. JIMÉNEZ. Op. Cit., p. 9.

⁴⁷ J. JIMÉNEZ. Op. Cit., p. 9.

2.8.1 Tecnología DSRC o RFID “sistema de comunicación vehicular”:

Es usada cuando se incorporan peajes en un lugar específico ya que la tecnología está diseñada para comunicarse con una etiqueta sobre una distancia muy corta de hasta 7 o 10 mts. Esta tecnología requiere de un costo inicial para proveer a los vehículos de TAGS (Transponerse, OBU, OBE), procesos automatizados y permisos. Esta tecnología permite transitar a velocidad normal⁴⁸.

2.8.2. Cobro de peaje por video (ANPR):

Funciona a través del reconocimiento de las placas y el tipo de vehículo que ingresa a una vía expresa; no requiere de ninguna tecnología en el vehículo para ser instalado, el costo inicial de la implementación de esta tecnología es más bajo, pero es usada para cuando se tienen pequeños porcentajes de vehículos y requiere de intervención manual para la interpretación de las imágenes más pobres⁴⁹.

Tabla 2. Cobro por congestión sistemas basado en equipo intra vehiculares.

Familia	Sistemas de Cobro Electrónico	
Clase	Basados en Equipos Intra Vehicular	
Tecnología	Tecnologías de Localización Vehicular (VPS) y GNSS/GLONASS	Sistema de redes intracelular
Subtecnología	OBU/Odómetro/Tacógrafo	OBU
	Pórticos/Postes	Tarjeta Inteligente
	Tarjeta Inteligente	Odómetro Tacógrafo
	Repetidores de Señal	

Fuente: University College London-Universidad de los Andes. *Cobros de congestión en ciudades colombianas. 2003*⁵⁰. 0

⁴⁸ J. KIM. Op. Cit., p. 26.

⁴⁹ Ibid., p. 31.

⁵⁰ UNIVERSITY COLLEGE. Op. Cit., p. 14.

Tabla 3. Cobro por congestión sistemas electrónicos.

Familia	Sistemas de cobro electrónico	
Clase	Basados en la estructura de pórticos postes	
Tecnología	Reconocimiento por videos y Reconocimiento Automático de Placas	DSRC: Infrarrojo, Microondas, y RFID Cobro de Flujo Interrumpido Usando Transpondedores y Pórticos
Subtecnología	Cámaras	Antenas
	Dispositivos de Iluminación	Pórticos/Postes
	Dispositivos de Clasificación Vehículos	Tags/Transpondedores/Unidad Intra Vehicular
	Centro de Control de Procesamiento de Datos y Verificación	Rasdio/Frecuencia/Infrarrojo
		Centro de Control de Procesamiento de Datos y Verificación

Fuente: University College London-Universidad de los Andes. *Cobros de congestión en ciudades colombianas. 2003*⁵¹.

2.9. TECNOLOGÍAS NUEVAS PARA EL COBRO

2.9.1. Sistema de peaje mediante odómetro

El proyecto pretende analizar la viabilidad técnica y económica de implementar en las carreteras una tarifa basada en la distancia recorrida. Para llevar a cabo este proyecto es necesario la instalación en los vehículos de un sistema de conteo de abordó (odómetro) que permita el seguimiento del número de millas recorridas.

2.9.2. Sistema de peaje mediante telefonía móvil

Dada la cobertura casi total de las actuales redes de telefonía 3G/4G, este tipo de tecnología tiene un enorme potencial para ser aplicada en sistemas de peajes por

⁵¹ Ibid., p. 32.

distancia recorrida. El sistema consistiría básicamente en la instalación en el automóvil de un chip con comunicación continua 3G/4G. Gracias a estas comunicaciones y el despliegue de sistemas GPS en telefonía móvil, se podría determinar la distancia recorrida por el vehículo pudiendo incluso efectuar el pago del peaje.

2.9.3. Sistemas de peaje basados en tecnología GPS

Es una de las soluciones futuras más prometedoras. El peaje por satélite utiliza una combinación de sistema por satélite y comunicaciones móviles. Para determinar la posición exacta del vehículo se utiliza un sistema de rastreo basado en satélites, mientras que para calcular y efectuar el pago de la tarifa de peaje se utiliza la tecnología de comunicaciones móviles. Para aplicar este sistema todos los vehículos necesitan de una unidad de abordo que registre los movimientos del vehículo mediante la descarga periódica de sus coordenadas con marca de tiempo desde el satélite. El peaje por satélite se considera una de las tecnologías más favorable para la aplicación de peajes electrónicos porque permite un peaje exacto basado en la distancia.

2.9.4. Peaje en Flujo Libre

Los sistemas de peaje tipo “free-flow” son un tipo de peaje electrónico que permite cobrar a los usuarios de una vía sin obligarles a parar ni a reducir su velocidad y que posibilitan diferentes opciones para su aplicación como los Sistemas “free flow” montados en pórticos: aprovecha como infraestructura telemática el transpondedor (OBU) y los receptores-antena incluidos en el complejo sistema de equipos electrónicos dispuestos sobre pórticos encumbrados a lo largo de la traza del vial, permitiendo la identificación e individualización de cada vehículo. También está el Sistema Inteligente de transporte (ITS): Constituye el sistema de gestión de tráfico en carretera. Conformado por diversos dispositivos que recogen toda la información necesaria de la vía y se la comunican a los sistemas que tratan los datos, en este caso, el Back Office y el Módulo de Tarificación Dinámica.

Otros de los elementos que conforman el sistema son los TAG'S (Etiqueta o tele-vía), el cual es un Transmisor ubicado en el vehículo que contiene información de este utilizado para el reconocimiento del vehículo en circunstancias específicas de transacción por cobro de peaje en sistemas de flujo libre en el momento justo que atraviesa la sección de pórtico. El pórtico soporta también diferentes tipos de sensores, el primero es el sensor de reconocimiento VDC el cual se activa inmediatamente el vehículo se acerca a la estructura rígida con el fin de identificar mediante sensores el TAG de cada vehículo y así efectuar la transacción. También del sensor de velocidad TRX el cual reconoce la velocidad con la que el vehículo automotor atraviesa la sección del pórtico con el fin de identificar posibles infracciones a las normas de tránsito que se encuentren en la zona, cuando se genera la infracción de inmediato esta información se transmite a la Back Office de la cual se hablara más adelante⁵².

Mediante “videotolling” o video detección el cual está basado en la lectura de matrículas mediante cámaras y su posterior reconocimiento gracias a un software especializado. Para ellos se utiliza tecnología ANPR (*Automated Number Plate Recongnition*) basada en fotografía digital y algoritmos de reconocimiento óptico de caracteres⁵³.

Otro de los sistemas está basado en el *Optical Character Recognition* (OCR) para identificar a los vehículos que pasan por un lugar en particular. Los sistemas pueden escanear las matrículas de los vehículos que transiten por el peaje a velocidades de hasta 200 km/h con una frecuencia aproximada de una por segundo. Esta tecnología puede ser aplicada en peajes urbanos. En el caso de la video detección los algoritmos utilizados para el reconocimiento de matrícula siguen las siguientes fases durante el proceso de identificación de la matrícula⁵⁴.

⁵² D. ALBALATE. Op. Cit., p. 26.

⁵³ K. KOTTENHOFF. Op. Cit., p. 26.

⁵⁴ D. ALBALATE. Op. Cit., p. 26.

2.10. INVESTIGACIONES DE PEAJES URBANOS EN COLOMBIA

A pesar de la poca experiencia que ha tenido Colombia en sistemas de cobro urbanos por el uso de las vías, existen algunos estudios de casos (IDU, SDM, CAF, Universidades) en diferentes ciudades basados en experiencias internacionales. Algunos ejemplos en el país se encuentran en Bogotá en la Carrera 7 y Auto norte (CII 72 y 118) por el tramo que limita con Mosquera y Chía un peaje electrónico Free Flow (DSRC), se realiza un cargo por congestión el cual está sujeto a la capacidad de pago del ciudadano y del tipo de vehículo. El recaudo se distribuye 50% al transporte masivo, 20% al transporte no motorizado, 20% al mantenimiento de la infraestructura vial y el 10% a mitigación de contaminación ambiental. También en Cali sobre la Autopista Sur (CII 23 y 26) y avenida Pasoancho (Cr 44 y 56) y Medellín en la Avenida el Poblado con el mismo uso y beneficios expuestos que el de Bogotá.

Según los datos recopilados en este trabajo de investigación el sistema Free Flow, mencionado anteriormente, cumple con los criterios de implementación para este tipo de peajes como alternativa de solución a la congestión ya que mejora la movilidad dentro de la ciudad evitando la acumulación masiva del carro particular que es el mayor problema, por la que se ve afectado el tránsito en Bucaramanga permitiendo un acceso rápido sin pérdidas de tiempo siendo usado mayormente en carreteras, pero cumpliendo como peaje urbano.

2.11. VÍAS ALTERNATIVAS DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se describe las vías alternas que podrían usar los usuarios que obtén por no pagar esta tarifa de congestión en los puntos de análisis, véase anexo

3. RECOPIACION DE DATOS

Los sectores estudiados se localizan en el Área Metropolitana de Bucaramanga, entre el Municipio de Bucaramanga y Floridablanca, más exactamente, en el tramo que conduce del intercambiador de la Puerta del Sol (Bucaramanga) hasta el puente Provenza (Floridablanca), localizado al sur de la ciudad de Bucaramanga, para el viaducto García Cadena, el viaducto La Flora que también comunica el Municipio de Bucaramanga y Floridablanca, y el puente la Novena, que comunica los sectores de la Calle 45 con Carrera 9a y la Ciudadela Real de Minas. A continuación, se muestran cada uno de las zonas de estudio donde se implementaría la medida propuesta.

Figura 4. Viaducto García Cadena.



Fuente: GOOGLE MAPS

Figura 5. Viaducto La Flora.



Fuente: GOOGLE MAPS

Figura 6. Puente La Novena.



Fuente: GOOGLE MAPS

3.1. ESTIMACIÓN DEL COSTO GENERALIZADO

Inicialmente para el cálculo de la estimación del costo generalizado se debe cuantificar el valor del tiempo, el cual se estudia dentro de la teoría microeconómica de modelos de elección discreta, en los cuales se relaciona su magnitud con el salario del individuo que enfrenta el problema de elección del modo de transporte. En el cual nos basamos en los resultados obtenidos de las encuestas de preferencias declaradas realizado por Jiménez y Salas en el artículo Aplicación de Modelos Econométricos para Tasa por Congestión Vehicular⁵⁵ donde se determinaba el valor del tiempo utilizando variables macroscópicas de la teoría del flujo vehicular, dio como resultado 282,75 COP/min.

Dentro de un proceso de asignación de tráfico existen unas variables de formulaciones que son empleadas para estipular el tiempo de viaje en función del flujo de vehículos, llamadas funciones flujo-demora, como la función de Bureau Public Roads (BPR), siendo la ecuación (1):

Aplicando la ecuación (1), y con información de las tablas 12, 13 y 14, se obtiene la función flujo-demora para cada punto donde se implementará la medida de cobro por congestión.

3.2. ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO MEDIO USUARIO CME (Q)

La función de costo medio CMe (q) se estima en función del uso de las vías $q(\text{veh-km})$, donde se tiene en cuenta una constante que considera los costos de operación y de estacionamiento del vehículo privado, y una parte variable que es el producto del tiempo de viaje por el valor del tiempo.

⁵⁵ J. JIMÉNEZ. Op. Cit., p. 9.

Para el análisis de la función del costo medio para cada uno de los arcos correspondientes, el valor de la constante está definida por el costo de operación con un valor de 778 COP/km, calculado con la función descrita para el costo del tiempo en 0, y el costo de estacionamiento con un valor de 133 COP/km, siendo el valor de la constante la suma de estos, 911 COP/km.

Para la variable del modelo se tiene en cuenta el valor del tiempo por vehículo de 282,75 COP/min, que fue determinado a partir de encuesta de preferencia declarada realizada por Jiménez y Salas⁵⁶, con el que busca estimar la influencia de cobro de la tasa por congestión a los vehículos que congestionan la vía, y con el valor del tiempo de utilizar un taxi compartido de 222 COP/min, obteniendo de la media de estos valores, el valor medio del tiempo, siendo igual a 252,37 COP/min⁵⁷.

Ya habiendo determinado la parte variable y constante del modelo y la función flujo-demora para cada uno de los puntos de estudio, se determina la función del costo medio del usuario CMe para cada una de las zonas.

3.3. ESTIMACIÓN DE LA FUNCIÓN COSTO MARGINAL SOCIAL CMA (Q)

La curva de costo marginal social CMa (q), refleja tanto los costos que enfrenta un usuario de la vía como el costo que este impone a los demás usuarios por transitar en la misma, habiendo ya obtenido la función de costo medio del usuario para cada uno de los puntos de estudio, al sumar esta función del costo medio más su derivada multiplicada por un factor q que corresponde al uso de la vía, obtenemos la función CMe(q), como se define en la ecuación (2). Se calcula la función para cada uno de los puntos.

⁵⁶ Ibid., p. 39.

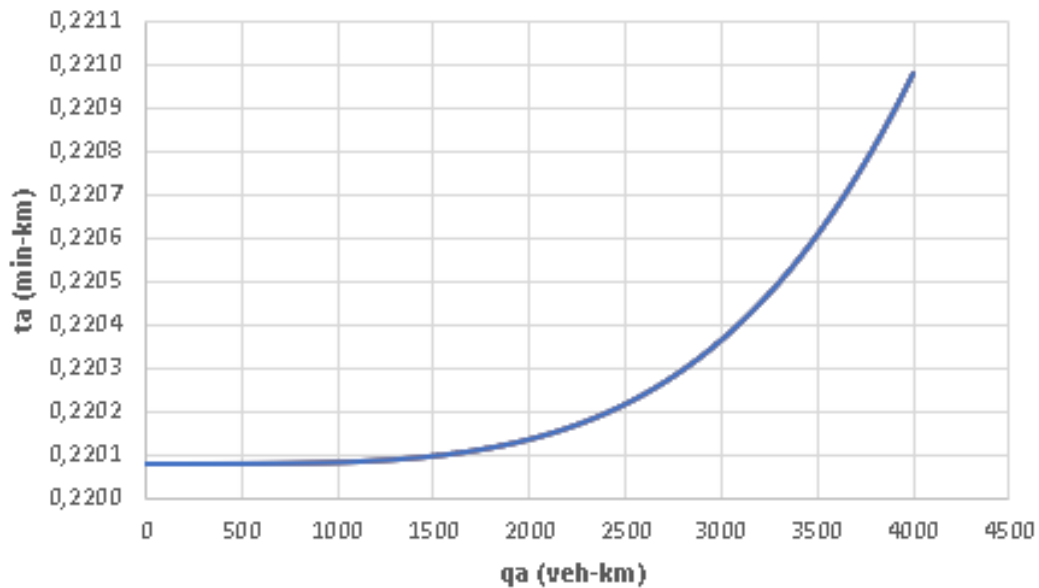
⁵⁷ Ibid., p. 39.

4. ANÁLISIS SEGÚN ZONA DE ESTUDIO

4.1. ANÁLISIS VIADUCTO GARCÍA CADENA

4.1.1. Función Flujo-Demora del Viaducto García Cadena

Gráfica 2. Función flujo demora para el arco Bucaramanga-Floridablanca, García Cadena.



$$t = 0.0000000004q^2 - 0.0000003q + 0.306 \quad (3)$$

4.1.2. Función CMe del Viaducto García Cadena

$$CM_e = \left(911 \frac{\$}{Km} \right) +$$

$$(0,0000000004q^2 - 0.0000003q + 0.306) \frac{min}{Km}$$

$$\times 252,37 \frac{\$}{Km}$$

$$CMe = 0.00010095q^2 - 0.00007571q + 988.23 \quad (4)$$

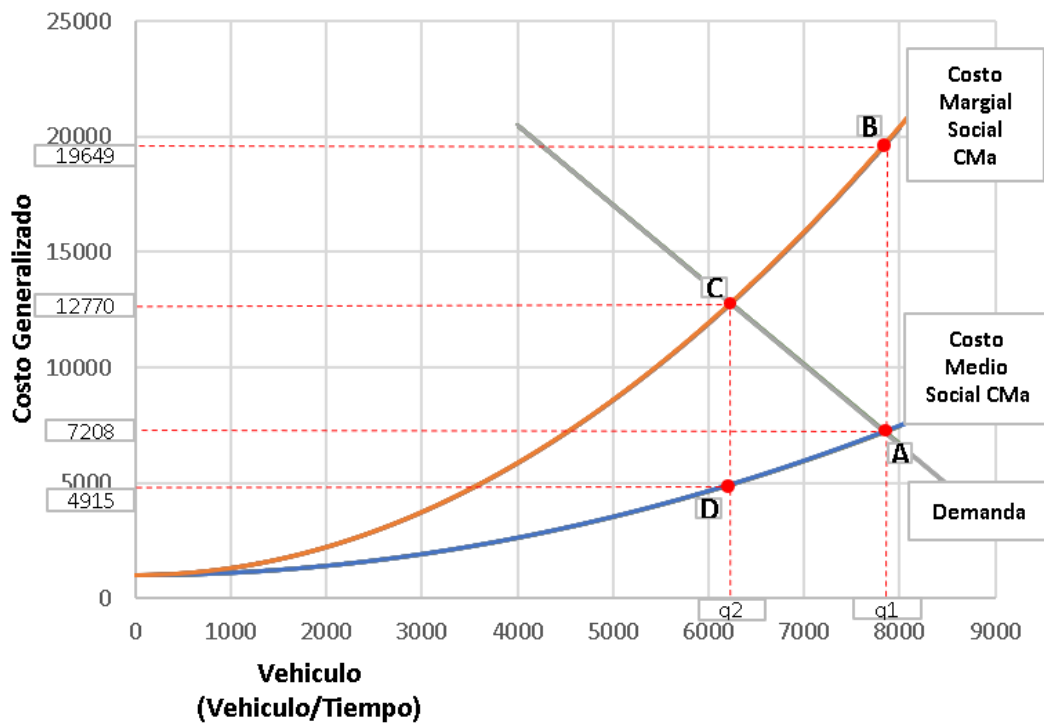
4.1.3. Función CMa del Viaducto García Cadena

$$CMa = 0.000302844q^2 - 0.000151422q + 988.23 \quad (5)$$

4.1.4. Función de demanda del Viaducto García Cadena

$$P: -3.449898q + 34290 \quad (6)$$

Gráfica 3. Tarifa basada en costos marginales de congestión para el García Cadena.

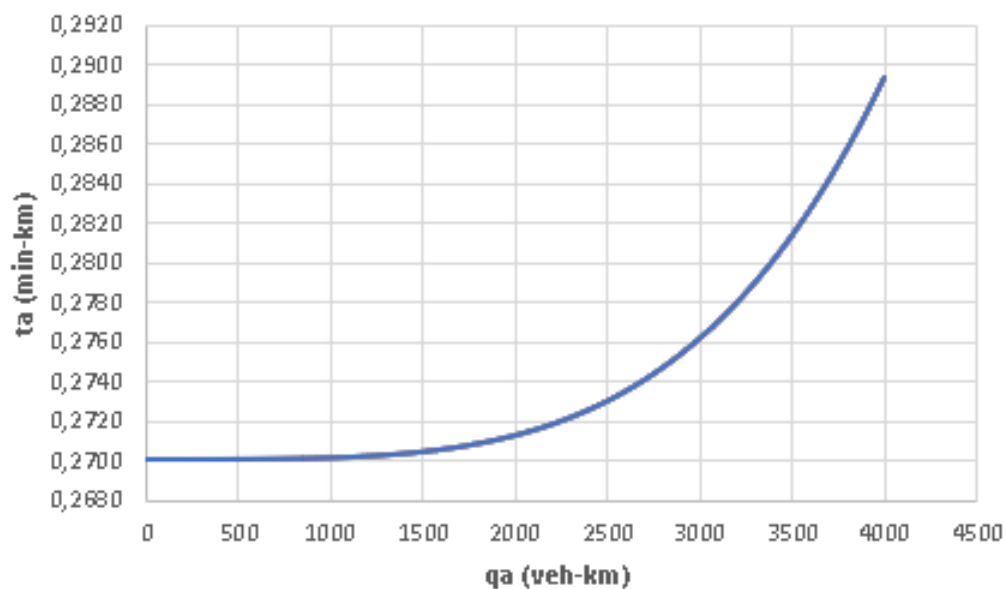


Tarifa optima de congestión: 7900 COP

4.2. ANÁLISIS VIADUCTO LA FLORA

4.2.1. Función de Flujo-Demora del Viaducto la Flora

Gráfica 4. Función flujo demora para La Flora.



$$t = 0.000000001q^2 - 0.000003q + 0.2701 \quad (7)$$

4.2.2. Función CMe del Viaducto la Flora

$$CMe = \left(911 \frac{\$}{Km} \right) +$$

$$(0,000001q^2 + 0,000003q + 0,2701)$$

$$* 252,37$$

$$CMe = 0.000000505q^2 - 0.0007571q + 516.96 \quad (8)$$

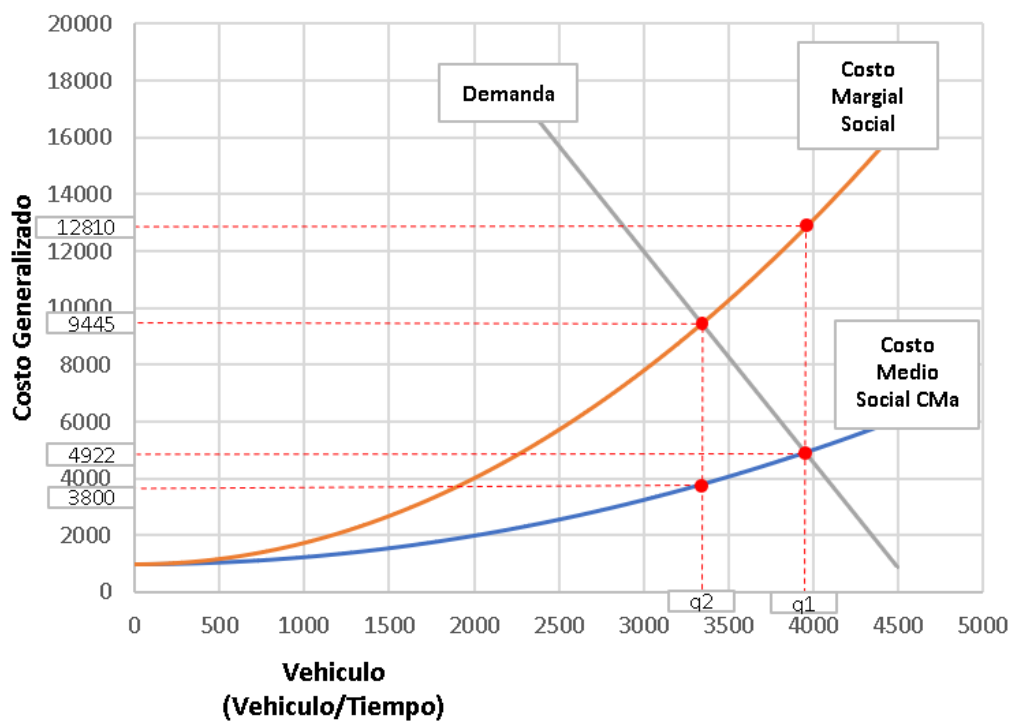
4.2.3. Función CMa del Viaducto la Flora:

$$CMa = 0.00025347q^2 - 0.0007571q + 979.17 \quad (9)$$

4.2.4. Función de demanda del Viaducto la Flora

$$P: -7.427478 + 34290 \quad (10)$$

Gráfica 5. Tarifa basada en costos marginales de congestión para La Flora.

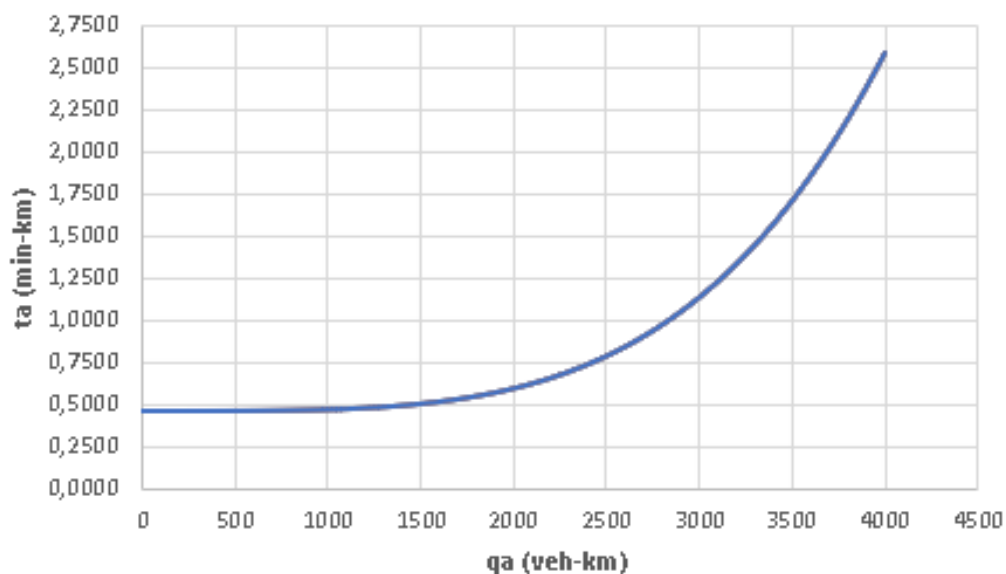


Tarifa óptima de congestión: 5600 COP

4.3. ANÁLISIS VIADUCTO LA NOVENA

4.3.1. Función de Flujo-Demora del Puente la Novena

Gráfica 6. Función flujo demora para el arco del puente La Novena.



$$t = 0.0000002q^2 - 0.0002q + 0.4584 \quad (11)$$

4.3.2. Función CMe del Puente la Novena

$$CMe = \left(911 \frac{\$}{Km} \right) +$$

$$(0,0000002q^2 + 0,0002q + 0,4584) \frac{min}{Km} *$$

$$252,37 \frac{\$}{Km}$$

$$CMe = 0.000505q^2 - 0.050474q + 1026.68 \quad (12)$$

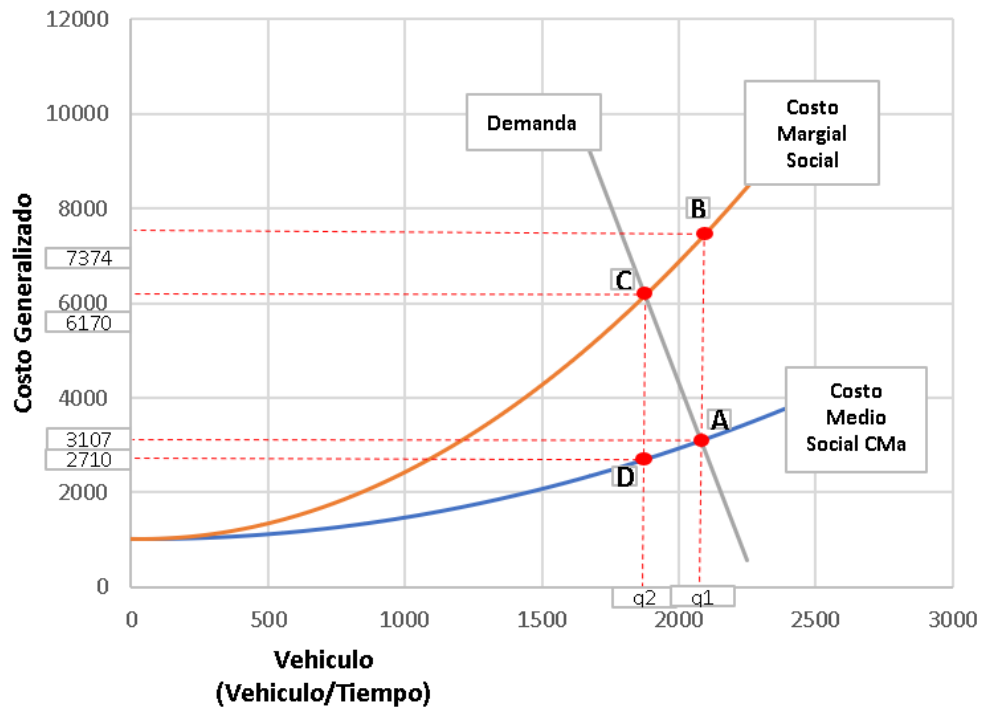
4.3.3. Función CMa del Puente la Novena:

$$CMa = 0.000151q^2 - 0.100948q + 1026.69 \quad (13)$$

4.3.4. Función de demanda del Puente la Novena

$$P: -14.984403 + 34290 \quad (14)$$

Gráfica 7. Tarifa basada en costos marginales de congestión para La Novena.



Tarifa óptima de congestión: 3500 COP

5. RESULTADOS

De acuerdo con el anterior análisis para cada uno de los puntos de estudio, se calculó la tarifa óptima para cada punto, obteniendo para el viaducto García Cadena una tarifa de \$7900 COP, logrando una reducción del tránsito en 20.5%, la tarifa obtenida en el viaducto La Flora es de \$5600 COP, con una reducción del 15.4% y para el viaducto de La Novena, una tarifa de \$3500 COP, con una reducción del tránsito del 9.8%, con los resultados obtenidos se unifica una tarifa para el cobro por congestión en los puntos analizados del Área Metropolitana de Bucaramanga, siendo de \$ 5600 COP, donde no se tendrá en cuenta el a cobro a las motocicletas,

Tabla 4. Escenario con cobro por congestión para los viaductos analizados.

Viaducto / Descripción	Sentido Sur - Norte		
	García Cadena	La Flora	La Novena
Aplicación de Tasa por Congestión (COP)	7900	5600	3500
Tarifa Unificada (COP)		5700	
Viajes realizados con tasa por congestión	2220	1785	652
Capacidad Viaducto La Flora Veh - mix	7822	5427	2646
Estado	Sin Congestión	Sin Congestión	Sin Congestión
Recaudo Mensual Estimado (COP)	379.620.000	305.235.000	111.492.000
Recaudo anual estimado (COP)	4.555.440.000	3.662.820.000	1.337.904.000
Recaudo Anual AMB estimado (COP)		9.556.164.000,00	

Se establece una tarifa unificada para el cobro por congestión en el Área Metropolitana de Bucaramanga de \$5700 COP.

Con estos datos se hace la comparación del flujo con y sin cobro por congestión usando el software PTV Vissim

Figura 7. Comparación del flujo con la implementación de la media en el Viaducto García Cadena.

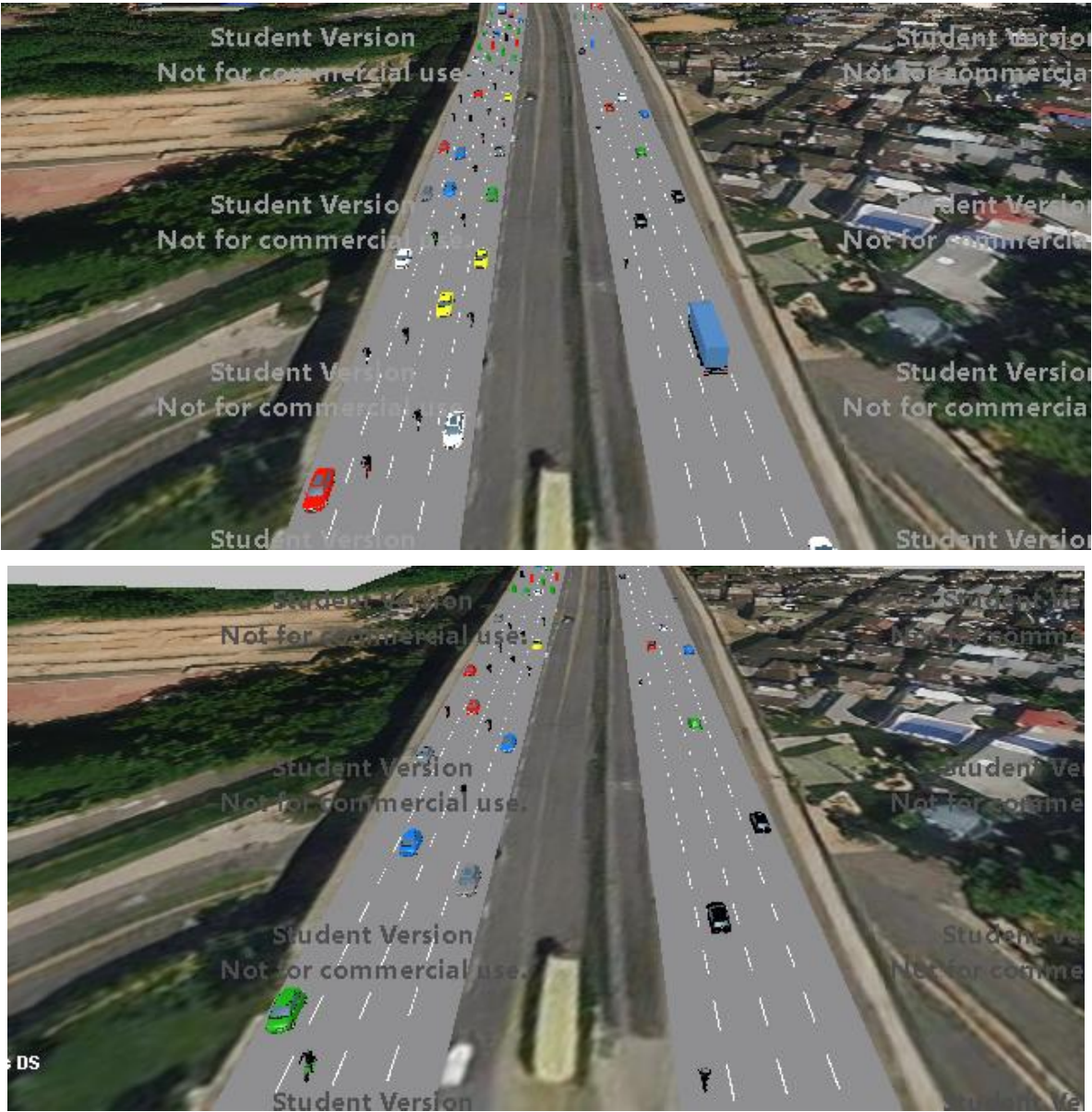


Figura 8. Comparación del flujo con la implementación de la media en el Viaducto García Cadena.



Figura 9. Comparación del flujo con la implementación de la media en el Puente La Novena.



6. CONCLUSIONES

Por medio de este trabajo se determinó una tarifa para cada una de las zonas estudiadas, donde se expone de manera aproximada los costos sociales marginales y los costos generalizados de cada viaje que los usuarios imponen sobre los demás. Para el caso del Viaducto García Cadena, 7850 vehículos ignoran las externalidades que imponen sobre los demás usuarios. Considerando el costo marginal debido a la congestión en la que se tiene un valor de demanda, se observa que los usuarios circulan por la vía disfrutando con un beneficio a un costo de \$ 7208 COP, pero imponiendo a los demás usuarios costos de \$ 19.649 COP. La tarifa óptima que debe aplicarse para tener niveles positivos de circulación y poder internalizar los costos de congestión para el Viaducto García Cadena es de \$ 7855 COP, aproximadamente \$7900 COP reduciendo el flujo vehicular en 20,5%.

En el Viaducto La Flora, 3954 vehículos ignoran las externalidades que imponen sobre los demás usuarios, considerando el costo marginal debido a la congestión en la que se tiene también un valor de demanda considerable. Se observa que los usuarios circulan por la vía disfrutando con un beneficio a un costo de \$4922 COP, pero imponiendo a los demás usuarios costos de \$12.810 COP. La tarifa óptima que debe aplicarse para obtener un flujo óptimo y poder internalizar los costos de congestión para el Viaducto La Flora es de \$ 5644 COP, aproximadamente \$5600 COP, reduciendo el flujo vehicular en 15,4%.

Y para el Puente La Novena, entre los 3 puntos de estudio analizados, es el que menos problemas de congestión presenta, aunque 2081 vehículos ignoran las externalidades que imponen sobre los demás usuarios, considerando el costo marginal debido a la congestión en la que se tiene también un valor de demanda moderado, se observa que los usuarios circulan por la vía disfrutando con un beneficio a un costo de \$ 3107 COP, pero imponiendo a los demás usuarios costos de \$7374 COP. La tarifa óptima que debe aplicarse para obtener un flujo óptimo y poder internalizar los costos de congestión para el viaducto La Flora es de \$ 3460 COP, aproximadamente \$ 3500 COP, reduciendo el flujo vehicular en 9,8%.

Se realiza una tarifa unificada para el cobro por congestión en el Área Metropolitana de Bucaramanga de \$5700 COP.

Mediante la implementación de esta medida, se estaría generando bienestar social y la internalización de los costos, y un ingreso anual para el Viaducto García Cadena de \$4.555.440.000 COP, para el Viaducto La Flora un ingreso anual de \$3.662.820.000 COP, y para el puente La Novena, un ingreso anual de \$1.337.904.000 COP, dando un total de ingresos anuales al Área Metropolitana de Bucaramanga de \$9.556.164.000 COP, el cual deberá ser redistribuido en una mejora permanente y en medidas innovadoras que conduzcan al fortalecimiento del transporte público y el transporte no motorizado.

En los casos internacionales, previo a la implantación de la medida se reforzó la cobertura y calidad del transporte público y se adelantó un proceso de socialización y reeducación a los ciudadanos. La ruta crítica del cronograma de implementación depende de los aspectos legales y políticos, logrando para aquellos países que cuentan con la implementación dentro de la ciudad bajar el número de vehículos, mejorando la infraestructura de la zona y fomentar el uso del transporte público.

La implementación de un esquema de cobro por congestión debe estar enmarcada en una política integral de movilidad sostenible de tal manera que impulse la consecución de los objetivos del proyecto y de la estrategia de movilidad de la ciudad. Esto implica que, de manera previa y simultánea a la implementación de un sistema de cobro, las falencias existentes del sistema de movilidad deben ser atendidas, particularmente en el transporte público y el no motorizado. 0

7. RECOMENDACIONES

Las futuras investigaciones referentes a los cobros por congestión deben tomar como referencia y conocer de primera mano la perspectiva de la comunidad teniendo en cuenta una evaluación completa de las necesidades en cuestión de movilidad y transporte sostenible.

Se sugiere estudiar la aplicación y adaptación de la medida de cobro por congestión a las motocicletas en el AMB, teniendo en cuenta el alto crecimiento que han tenido en los últimos años, que contribuye a los problemas por congestión, incrementando las externalidades negativas del transporte.

Se deberá realizar investigaciones futuras con el seguimiento, control e inversión en infraestructura vial con los recursos que puedan generar estos sistemas, estableciendo una evaluación económica con la finalidad de determinar los posibles impactos sociales generados por la instalación de un peaje urbano, lo anterior aplicando métodos de evaluación para determinar las variables involucradas para el desarrollo de los cobros por gestión, dentro de los que se destacan encuestas de preferencias declaradas, para la determinación y la disposición al pago de un peaje.

BIBLIOGRAFIA

A. BULL, "Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo", CEPAL, Santiago de Chile, 2003, p. 194.

A. DE PALMA & R. Lindsey, "Traffic congestion pricing methodologies and technologies". Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 19, no.6, pp. 1377-1399. 2011.

BERNAL BOTERO, M. & Zuluaga Arango, M. Determinación de la tarifa para un esquema de cobro de congestión para los corredores principales del centro de Medellín. [Tesis de pregrado]. Envigado, Universidad EIA, 2019.

"CATALIZADORES DEL CAMBIO URBANO (7) peaje urbano en Londres", Metrhispanico.com, Londres, 2015. [https://metrhispanico.com /tag/londres/](https://metrhispanico.com/tag/londres/)

D. ALBALATE & G. Bel. "What Local Policy Makers Should Know about Urban Road Charging: Lessons from Worldwide Experience". Public Administration Review, vol. 69, no.5, pp. 962-975. 2009.

DIAZ LÓPEZ, Y. & Sanguino Páez, G. Propuesta de una tipología adecuada de peaje urbano para el centro ampliado de la ciudad de Bogotá. [Tesis de maestría]. Bogotá. Universidad Santo Tomás. 2021.

E. POZUETA, "La experiencia Internacional en peajes urbanos", Instituto Juan de Herrera. Madrid, España: Faster, 2008.

GUZMAN GARCIA, L. "Los Costes de la Congestión Urbana. Estimación de Cambios en el Bienestar Derivados de la Implementación de un Cobro por Congestión". IX Congreso de Ingeniería de Transporte. Madrid, 2010.

I. GRANADA. “El peaje a congestión en Londres: Su aporte a la movilidad sostenible”. Revista de ingeniería Universidad de los Andes-Bogotá, no. 29, pp. 137-147. 2009.

J. GRISOLÍA, F. Lopez & J. Ortúzar. “Increasing the acceptability of a congestion charging scheme”. Transport Policy. Vol. 39. Pp. 37-47. 2015.

J. JIMÉNEZ SERPA & M. Salas Rondón. “Aplicación de Modelos Económicos para Estimar la Aceptabilidad de una Tasa por Congestión Vehicular”, INGE CUC, vol. 13, no. 2, pp. 60-78, 2017.

J. KIM, J. Schmöcker & R. Noland. “Attitudes towards road pricing and environmental taxation among US and UK students”. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol.48, pp. 50-62.2013.

J. MUÑOZ, “Disponibilidad y accesibilidad en el transporte público madrileño como garantía de equidad social ante la aplicación de un peaje urbano para la ciudad de Madrid”, Investigación europea de dirección y economía, no. 20, pp. 47-54, 2013.

J. MUÑOZ & F. Anguita, “Los peajes urbanos como factor determinante de sostenibilidad y competitividad en el transporte urbano: Un estudio aplicado a Madrid”. Eure, vol. 44, no. 131, pp. 53-74. 2018.

J. PINEDA, “147% aumentó en Bucaramanga y su área el parque automotor”, Bucaramanga: Vanguardia.com,2021. <https://www.vanguardia.com/area-metro-politana/bucaramanga/147-aumento-en-bucaramanga-y-su-area-el-parque-automotor-CX4088712>

K. KOTTENHOFF & K. Brundell-Freij, K. “The role of public transport for feasibility and acceptability of congestion charging – The case of Stockholm”. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol.43, no.3, pp. 297-305. 2009.

L. MARQUEZ & V. Cantillo., “Evaluación de los parámetros de las funciones de costo en la red estratégica de transporte de carga para Colombia”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 29, no. 2, 2011.

LINEI, Katherine. “Efecto de un cobro por congestión en la elección modal de motociclistas ” Universidad Nacional de Colombia. 2019

PEÑA CABRA, A. Determinación del factor de equivalencia de motocicletas en flujo ininterrumpido en vías con pendiente 0% de 3 carriles en Colombia,[Tesis de Maestría]. Bogotá, Universidad de los Andes.

RAMOS GUERRERO, R. Cobros por congestión como alternativa al “pico y placa” en las ciudades colombianas: Caso Medellín. [Tesis de maestría]. Barranquilla, Universidad del Norte, 2015.

UNION TEMPORAL TRANSCONSULTA-PROFIT. “Visión del Plan y Objetivos del PMMM del AMB”. consultoría para la actualización del plan maestro metropolitano de movilidad (PMMM) del Área Metropolitana de Bucaramanga. 2022.

UNIVERSITY COLLEGE LONDON-Universidad de los Andes. *Cobros de congestión en ciudades colombianas. 2003.*


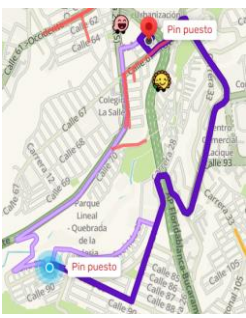


UNION TEMPORAL TRANSCONSULTA-PROFIT. “Línea Base y Diagnostico”. consultoría para la actualización del plan maestro metropolitano de movilidad (PMMM) del Área Metropolitana de Bucaramanga. 2022.

SOLARTE PORTILLA, J. Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares. [Tesis de maestría]. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. 2015.

S. NEUMANN, "Peajes urbanos: una opción para descongestionar la ciudad", Pauta.cl, 2018.<https://www.pauta.cl/calidad-de-vida/peajes-urbanos-una-opcion-para-descongestionar-la-ciudad>

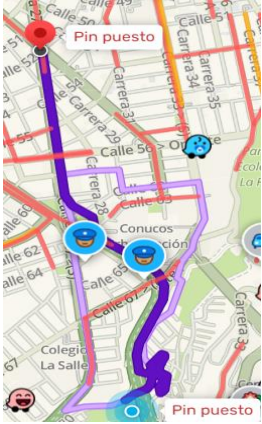
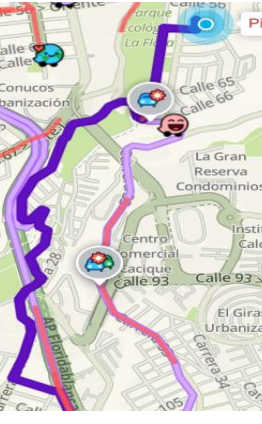
ANEXOS

Anexo A. Vías alternas al viaducto García Cadena

VIA ALTERNA	RTA	UBICACION	DETALLES VIA
Variante por la Carretera Antigua	Provenza - Plaza Satélite del Sur - Carretera Antigua - Puerta del Sol.		es una ruta relativamente corta, pero tiene varios tramos complicados, como la Plaza Satélite del Sur, donde normalmente hay congestión vehicular. Además, es una vía lenta por el alto flujo de carros y buses, la presencia de varios semáforos y la estrechez de los carriles.
Variante vía a San Luis	Provenza - San Luis - Carretera a Girón - Puerta del Sol.		se encuentra en unas aceptables condiciones, salvo el tramo que va de San Luis a la vía a Girón, que presenta grietas y gran cantidad de barro, producto del invierno y obras que se desarrollan en el lugar. En la carretera nacional. En los alrededores de La Salle la vía está sin
Variante vía a la Terminal	Provenza - Terminal de Transportes - Calle 61 - Puerta del Sol.		es la única que tiene garantizados dos carriles, pero tiene el recorrido más largo. El pavimento está en buenas condiciones, salvo en sectores residenciales como Real de Minas y San Gerardo, donde hay algunos huecos. Si usted va para el Centro de Bucaramanga es una buena
Anillo vial	Cañaveral-Rincon de Giron-salle-campo hermoso		sale de Cañaveral rumbo al Rincón de Girón. Allí tiene dos opciones, una desviándose por la vía a Girón, rumbo a La Salle, y otra siguiendo hasta la calle 45 y subiendo por Campo Hermoso. Esta ruta está en muy buenas condiciones y es muy rápida, pero es prácticamente cuatro veces


Para el Viaducto la flora se encontraron las siguientes vías alternativas, las cuales no exigen tener que circular por el área estudiada.

Anexo B. Vías alternas al viaducto La Flora

VIA ALTERNA	RUTA	UBICACION	DETALLES VIA
viaducto La Flora en el costado noroccidente	Carrera 33 - calle 62 - Avenida Gonzalez valencia - calle 63 - carrera 33		<p>Para esto, los conductores desviarán continuando por la carrera 33 en sentido sur-norte y girando por la calle 62 para tomar la Avenida González Valencia, continuar por la calle 63 para conectar con la carrera 33 en sentido norte-sur.</p>
vía antigua en sentido sur-norte	vía antigua en sentido sur-norte-carrera 36-cabezera llano		<p>vía antigua en sentido sur-norte, llegar a carrera 36 y conectar con el sector de Cabezera del Llano, o tomar la carrera 45 de los Barrios la Floresta y Terrazas.</p>

El puente de la novena tiene diferentes vías alternativas por donde se pueden transitar sin necesidad de pasar por este punto:

Anexo C. Vías alternas al puente La Novena

VIA ALTERNA	RUTA	UBICACION	DETALLES VIA
Por la calle 61	Barrio Mutis- Urbanizacion parque san remo -Calle 61- Carrera17		Esta ruta comunica la carrera 9 con el barrio Mutis es relativamente mas larga pero cuenta con buenas condiciones de vias doblecalzadas

Aforo vehicular de las 3 zonas

Se realizó un aforo vehicular en cada uno de los puntos de estudio con el fin de poder conocer el flujo que transita por estos sitios durante las horas pico tanto por entrada como por salida, mediante el diligenciamiento de diferentes formatos durante la visita de campo realizada en enero del 2022. Donde se obtuvieron los siguientes resultados:

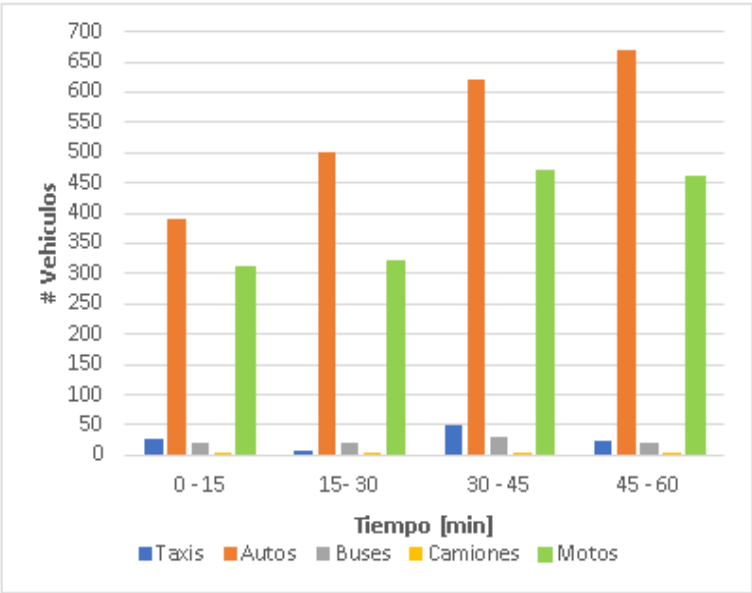
Viaducto la Flora

En el aforo vehicular realizado en ambos sentidos, entre las 18:00 a 19:00 se pudo observar que para el caso del Viaducto La Flora, en el sentido Bucaramanga-Floridablanca, que el mayor flujo de vehículos se obtuvo en el periodo de 18:45 a 19:00, el cual representa un total de 1178 vehículos, con un FHP (Factor de hora pico) de 0,839 el cual indica el grado de uniformidad que tiene el tránsito en dicha hora.

El menor flujo de vehículos que se pudo observar fue en el periodo de 18:00 a 18:15, con 751 vehículos, y durante el periodo de una hora en el sentido Bucaramanga-Floridablanca

el flujo vehicular que circuló por el viaducto la flora fue de 3954 vehículos de las diferentes categorías.

Durante este periodo el tipo de vehículo con mayor participación en la composición vehicular fue el auto particular con 2180 vehículos, que representa el 55% del flujo durante una hora, seguido de las motocicletas con 1560 vehículos, con el 39%, como se puede ver a continuación.



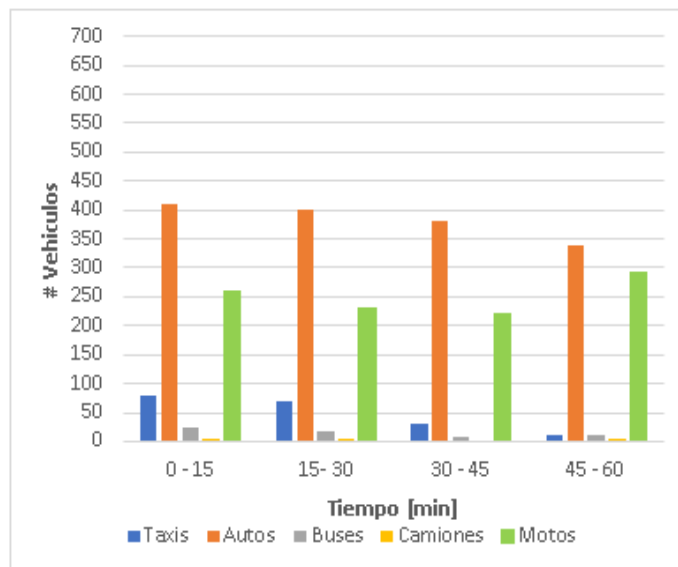
Esquema del flujo vehicular, Viaducto La Flora sentido Bucaramanga-Floridablanca.

Anexo D. Flujo vehicular, Viaducto La Flora sentido Bucaramanga-Floridablanca

Vehículo	Tiempo [min]				Volumen [veh/ h]	composición
	0 - 15	15- 30	30 - 45	45 - 60		
Taxis	28	7	50	25	110	2,78%
Autos	390	500	620	670	2180	55,13%
Buses	19	19	30	22	90	2,28%
Camiones	4	5	4	1	14	0,35%
Motos	310	320	470	460	1560	39,45%
Total	751	851	1174	1178	3954	100%

Para el flujo obtenido en el sentido Floridablanca-Bucaramanga entre las 18:00 a 19:00, fue de 2791 vehículos de las diferentes categorías, donde el vehículo con mayor participación fue el auto particular con 1530 vehículos, que representan el 55%, seguido de las motocicletas, con 1003 vehículos, que representan el 36%, donde la composición vehicular en ambos sentidos fue similar.

El mayor flujo de vehículos que circuló por este sentido se obtuvo en el periodo de 18:00 a 18:15, con 776 vehículos, con un FHP (Factor de hora pico) de 0,899, indicando el grado de uniformidad que tiene el tránsito en este periodo. Y el menor flujo se registró en el periodo de 18:30 a 18:45, con 638 vehículos.



Esquema del flujo vehicular, Viaducto La Flora sentido Floridablanca-Bucaramanga.

Anexo E. Flujo vehicular, Viaducto La Flora sentido Floridablanca-Bucaramanga

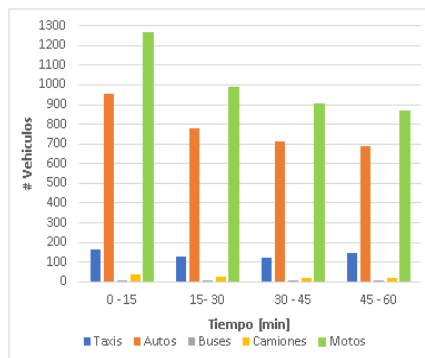
Vehículo	Tiempo [min]				Volumen [veh/ h]	composición
	0 - 15	15- 30	30 - 45	45 - 60		
Taxis	80	70	30	10	190	6,81%
Autos	410	400	380	340	1530	54,82%
Buses	25	17	8	10	60	2,15%
Camiones	1	4	0	3	8	0,29%
Motos	260	230	220	293	1003	35,94%
Total	776	721	638	656	2791	100%

Puente La Novena

Para el aforo realizado en el puente La Novena, en el sentido Bucaramanga-Floridablanca, entre las 19:15 a 20:15, se pudo observar que el mayor flujo de vehículos se obtuvo en el periodo de 9:45 a 20:00 durante el periodo de una hora analizada, el cual representa un total de 542 vehículos, con un FHP (Factor de hora pico) de 0,960 que indica el grado de uniformidad que tiene el tránsito en dicha hora.

El menor flujo de vehículos que se pudo observar fue en el periodo de 20:00 a 20:15, con 508 vehículos, y durante el periodo de una hora en el sentido Bucaramanga-Floridablanca el flujo vehicular que circuló por el puente La Novena fue de 2081 vehículos de las diferentes categorías.

Durante este periodo el tipo de vehículo con mayor participación en la composición vehicular fueron las motocicletas, con 1215 vehículos, que representa el 58% del flujo durante una hora, seguido del auto particular con 628 vehículos, con el 30%, como se puede ver a continuación.



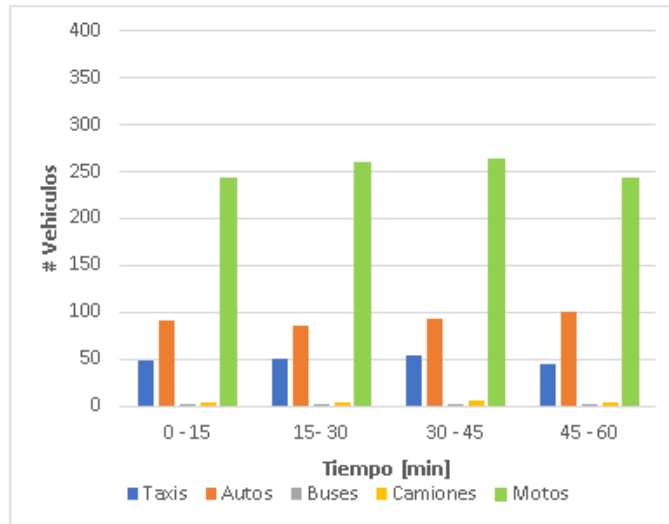
Esquema del flujo vehicular, Puente La Novena Floridablanca-Bucaramanga.

Anexo F. Flujo vehicular, Puente La Novena sentido Bucaramanga-Floridablanca

Vehículo	Tiempo [min]				Volumen [veh/ h]	composición
	0 - 15	15- 30	30 - 45	45 - 60		
Taxis	48	43	51	57	199	9,56%
Autos	151	164	168	145	628	30,18%
Buses	4	4	5	5	18	0,86%
Camiones	6	3	6	6	21	1,01%
Motos	303	305	312	295	1215	58,39%
Total	512	519	542	508	2081	100%

En el sentido Floridablanca-Bucaramanga, se obtuvo un flujo de 1605 vehículos de las diferentes categorías, donde el vehículo con mayor participación fueron las motocicletas con 1008 vehículos, que representan el 63%, seguido del auto particular, con 371 vehículos, que representan el 23%, donde la composición vehicular en ambos sentidos fue similar.

El mayor flujo de vehículos que circuló por este sentido se obtuvo en el periodo de 19:45 a 20:00, con 418 vehículos, con un FHP (Factor de hora pico) de 0,960, indicando el grado de uniformidad que tiene el tránsito en este periodo. Y el menor flujo se registró en el periodo de 19:15 a 19:30, con 389 vehículos.



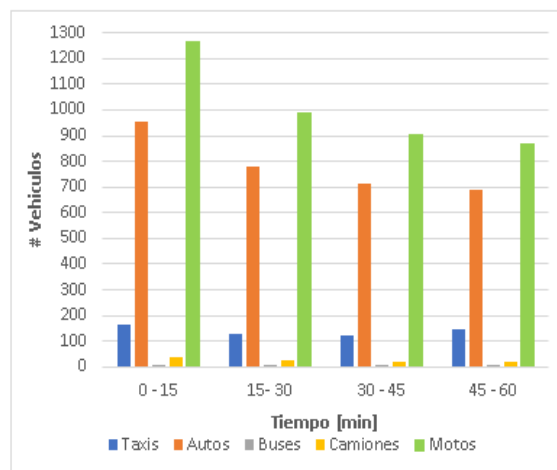
Esquema del flujo vehicular, Puente La Novena Bucaramanga-Floridablanca.

Anexo G. Flujo vehicular, Puente La Novena sentido Bucaramanga-Floridablanca

Vehículo	Tiempo [min]				Volumen [veh/ h]	composición
	0 - 15	15- 30	30 - 45	45 - 60		
Taxis	48	50	54	45	197	12,27%
Autos	92	86	93	100	371	23,12%
Buses	2	2	2	2	8	0,50%
Camiones	5	5	6	5	21	1,31%
Motos	242	260	263	243	1008	62,80%
Total	389	403	418	395	1605	100%

Viaducto García Cadena

En el aforo realizado en el viaducto García Cadena en el sentido Bucaramanga-Floridablanca, entre las 18:00 a 19:00, se pudo observar que el mayor flujo de vehículos se obtuvo en el periodo de 18:00 a 18:15, el cual representa un total de 2428 vehículos, con un FHP (Factor de hora pico) de 0,808 el cual indica el grado de uniformidad que tiene el tránsito en dicha hora. El menor flujo de vehículos que se pudo observar fue en el periodo de 18:45 a 19:00, con 1733 vehículos, y durante el periodo de una hora en el sentido Bucaramanga-Floridablanca el flujo vehicular que circuló por el viaducto García Cadena fue de 7850 vehículos de las diferentes categorías. Durante este periodo el tipo de vehículo con mayor participación en la composición vehicular fueron las motocicletas, con 4018 vehículos, que representa el 51% del flujo durante una hora, seguido del auto particular con 3143 vehículos, con el 40%, como se puede ver a continuación.



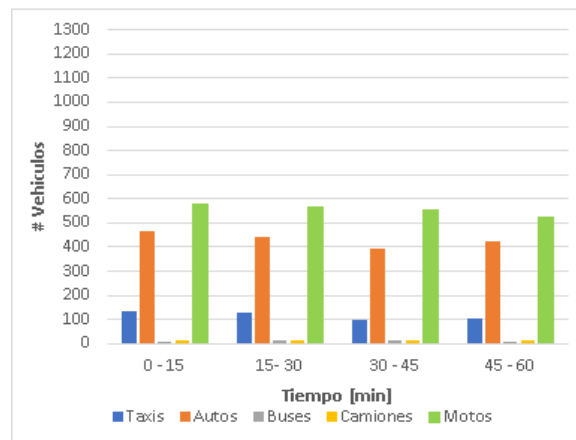
Esquema del flujo vehicular, Viaducto García Cadena sentido Bucaramanga-Floridablanca.

**Anexo H. Flujo vehicular, Viaducto García Cadena sentido Bucaramanga-
Floridablanca.**

Vehículo	Tiempo [min]				Volumen [veh/ h]	composición
	0 - 15	15- 30	30 - 45	45 - 60		
Taxis	167	129	121	144	561	7,15%
Autos	955	780	716	692	3143	40,04%
Buses	8	8	7	10	33	0,42%
Camiones	35	23	17	20	95	1,21%
Motos	1263	985	903	867	4018	51,18%
Total	2428	1925	1764	1733	7850	100%

En el sentido Floridablanca-Bucaramanga, se obtuvo un flujo de 4499 vehículos de las diferentes categorías, donde el vehículo con mayor participación fueron las motocicletas con 2225 vehículos, que representan el 49%, seguido del auto particular, con 1728 vehículos, que representan el 38%, donde la composición vehicular en ambos sentidos fue similar.

El mayor flujo de vehículos que circulo por este sentido se obtuvo en el periodo de 18:00 a 18:15, con 1202 vehículos, con un FHP (Factor de hora pico) de 0,936, indicando el grado de uniformidad que tiene el tránsito en este periodo. Y el menor flujo se registró en el periodo de 18:45 a 19:00, con 1070 vehículos.



Esquema del flujo vehicular, Viaducto García Cadena sentido Floridablanca-Bucaramanga.

Anexo I. Flujo vehicular, Viaducto García Cadena sentido Bucaramanga-Floridablanca

Vehículo	Tiempo [min]				Volumen [veh/ h]	composición
	0 - 15	15- 30	30 - 45	45 - 60		
Taxis	136	126	99	104	465	10,34%
Autos	466	439	394	425	1724	38,32%
Buses	9	11	11	6	37	0,82%
Camiones	11	13	12	12	48	1,07%
Motos	580	566	556	523	2225	49,46%
Total	1202	1155	1072	1070	4499	100%

Capacidad de las vías estudiadas

Habiendo determinado el flujo de vehículos que transitaron durante una hora por los puntos de estudio se calculó la capacidad de la vía, usando el Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para vías multicarril, INVIAS (2020).

El viaducto García Cadena, contando con 2 calzadas de 4 carriles más un carril exclusivo para el sistema de transporte masivo, cuenta con una longitud aproximada de 260m, cuenta con las siguientes capacidades en cada uno de sus sentidos:

Descripción	Viajes	Viajes
	B/ga - F/blanca	F/blanca- B/ga
Viajes Totales Veh-mix	7850	4499
Capacidad Viaducto Garcia Cadena Veh-mix	9839	4881
Estado	Congestión	Sin Congestión

Para el Viaducto La Flora, que se encuentra conformada por 2 calzadas de 3 carriles, cuenta con una longitud aproximada de 318m, se obtuvo la siguiente capacidad en cada uno de sus sentidos:

Anexo J. Escenario actual sin cobro para el Viaducto La Flora

Descripción	Viajes B/ga - F/blanca	Viajes F/blanca- B/ga
Viajes Totales Veh-mix	3954	2791
Capacidad Viaducto La Flora Veh-mix	6415	4219
Estado	Congestión	Sin Congestión

Por último, para el puente La Novena, que se encuentra conformada por 2 calzadas de 3 carriles, cuenta con una longitud aproximada de 551m, se obtuvo la siguiente capacidad en cada uno de sus sentidos.

Anexo K. Escenario actual sin cobro para el Puente La Novena

Descripción	Viajes B/ga - F/blanca	Viajes F/blanca- B/ga
Viajes Totales Veh-mix	2081	1605
Capacidad Puente La Novena Veh-mix	2934	2262
Estado	Sin Congestión	Sin Congestión