



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

## *Redistribución del uso del espacio viario como gestor eficiente de movilidad*

**Carlos Alberto González Guzmán**

**ADVERTIMENT** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA  
DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Ingeniería Civil: Transporte

# **Redistribución del uso del espacio viario como gestor eficiente de movilidad**

**Tesis doctoral realizada por:**

Carlos Alberto González Guzmán

**Dirigida por:**

Dr. Francesc Robusté



Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Caminos, Canales y Puertos de Barcelona

Barcelona, noviembre de 2020

## Resumen

El uso eficiente y equitativo del espacio viario urbano considerado como un bien público y un recurso escaso conlleva a otorgar prioridad a los modos de transporte sostenible (caminar, bicicleta y transporte público) en detrimento del vehículo particular por sus externalidades negativas (consumo de espacio, además de contaminación, ruido, accidentes, efecto barrera, etc.).

Esta tendencia es internacional y se aplica progresivamente desde los últimos decenios (con el decalaje temporal y graduación condicionados por el tipo de urbanismo local imperante), pero aún no cuenta con una formulación metodológica que le dé soporte científico: las decisiones se toman en el terreno político o basadas en “*modelos de oferta vial*”, que no siempre gozan de un respaldo técnico.

Esta tesis desarrolla las bases conceptuales y metodológicas de un instrumento alternativo de gestión de la movilidad denominado “*Retribución de Espacio Viario según Costes Sociales de Congestión*”. A partir de los principios de la microeconomía aplicada al transporte, se obtiene la cantidad (oferta) de espacio viario urbano actualmente usado por el vehículo privado que debe ser transferido a los modos de transporte sostenible, de forma similar a la tarifa o tasa internalizadora de externalidades de congestión formulada por Pigou hace un siglo.

La restricción del espacio al tránsito vehicular conlleva aumentos de los tiempos de viaje para el vehículo particular, pero aun así puede favorecer la movilidad global de la ciudad: los modos alternativos gozan de más espacio de uso exclusivo y aumentan su velocidad comercial y su cuota de participación, mientras que el tránsito remanente puede reasignarse en la red de forma más eficiente. El bienestar social mejora y el desincentivo en el uso del vehículo particular es similar a la tarifa.

El desarrollo metodológico se aplica al centro histórico de Santiago de Cali (Colombia), resultando que un esquema híbrido de “*Redistribución del Uso del Espacio Viario*” y “*Gestión y Control del Tráfico*” es el más adecuado para la internalización de externalidades por congestión.

Los resultados de la aplicación práctica sugieren que los beneficios sociales del escenario deseable con respecto al escenario base, incluyen una reducción del 26% en las emisiones contaminantes y un incremento de 52 puntos porcentuales en la participación de los modos de transporte sostenible en el uso del espacio viario urbano.

La investigación desarrollada es de aplicación general a ciudades o parte de ellas que pretendan humanizar y recuperar parte del espacio hoy en día ocupado por el tránsito rodado de vehículos particulares. También puede usarse para decidir implantar proyectos urbanos como las “*súper-manzanas*” (restricción del acceso y tránsito de paso en unidades de pocas manzanas contiguas) o en plasmaciones de “*urbanismo táctico*” como la nueva normalidad post-pandemia de la Covid19.

La investigación futura debería enlazar la metodología aquí desarrollada con el “*Diagrama Fundamental Macroscópico*” del tránsito urbano (relación entre flujo y densidad vehicular a nivel de zona), podría incluir otros efectos positivos ambientales y sociales, mejoras en el modelo de simulación y una sistematización para la generación de “paquetes” de secciones de calles y su continuidad a nivel de zona/barrio.

**Palabras clave:** *gestión de la movilidad, redistribución de espacio viario, Santiago de Cali, tasa de Pigou, urbanismo táctico, pacificación del tránsito, movilidad sostenible.*

## Abstract

The efficient and equitable use of urban road space considered as a public good and a scarce resource, leads to giving priority to sustainable transport modes (walking, cycling and public transport). Private vehicle sees its space reduced due to its negative externalities (space consumption, in addition to pollution, noise, accidents, barrier effect, etc.).

This trend is international and has been applied progressively since the last decades (with the time lag and graduation conditioned by the prevailing type of local urban planning). It still does not have a methodological formulation that brings the scientific support: decisions are made on the political ground or based on *"road/street supply models"*, which do not always have technical background.

This thesis develops the conceptual and methodological bases of an alternative mobility management instrument called *"Road Space Retribution Charge by Congestion Costs"*. We obtain the quantity (supply) of urban road space currently used by the private vehicle that must be transferred to sustainable transport modes using principles of transportation microeconomics. In a similar way but a century ago, Pigou formulated a tax to internalize the traffic congestion externalities.

The restriction of space to vehicular traffic entails increases in travel times for the private vehicle, but even so it can favor the global mobility of the city: alternative modes enjoy more space for exclusive use and increase their commercial speed and their modal share, while the remaining traffic can be reassigned in the network more efficiently. The social welfare improves and the disincentive in the use of the private vehicle is similar to the Pigouvian tax.

The methodological development is applied to the historic center of Santiago de Cali (Colombia), resulting in that a hybrid scheme of *"Reallocation of the Use of Road Space"* and *"Traffic Management and Control"* is the most appropriate for the internalization of externalities due to congestion.

The results of the practical application suggest that the social benefits of the desirable scenario with respect to the baseline scenario include a 26% reduction in polluting emissions and an increase of 52 percentage points in the participation of sustainable transport modes in the use of urban road space.

The research carried out finds general application in cities or parts of them that intend to humanize and recover part of the space currently occupied by the wheeled traffic of private vehicles. It can also be used to decide to implement urban projects such as *"super-blocks"* (restriction of access and through traffic in few contiguous blocks) or in embodiments of *"tactical urbanism"* such as the new post-pandemic Covid19 "normality".

Future research should link the methodology developed here with the *"Macroscopic Fundamental Diagram"* of urban traffic (relationship between traffic flow and density at the zone level), it could include other positive environmental and social effects, improvements in the simulation model, and a systemization for the generation of "packages" of street sections and their continuity at the zone / neighborhood level.

**Keywords:** *mobility management, redistribution of road space, Santiago de Cali, Pigou rate, tactical urban planning, traffic calming, sustainable mobility.*



## Agradecimientos

Esta tesis doctoral ha sido posible gracias al apoyo de diversas personas y entidades a las cuales quisiera expresarles mi gratitud.

En primer lugar, mi agradecimiento a mi Director de Tesis, el *Profesor Francesc Robusté de la Universidad Politécnica de Cataluña*, por orientarme de manera acertada hacia un enfoque de mayor rigor analítico en el campo del transporte y por asumir mi visión de Arquitecto-Urbanista como un valor agregado al momento de abordar los temas contemporáneos de movilidad sostenible. En lo humano, gracias por su paciencia y por sus palabras de aliento en los momentos adecuados.

Agradecimientos al *Ministerio de Asuntos Exteriores y Cooperación de España –MAEC–* y la *Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo –AECID–* por la beca que me otorgaron para realizar estudios de doctorado. Como resultado de su apoyo he podido hacer importantes contribuciones conceptuales y prácticas en movilidad sostenible en el contexto local (Santiago de Cali) nacional (Colombia) y regional (Latinoamérica).

Al *Dr. Ole Thorson* y sus socios *Jordi Pares* y *Joan Estevadeordal* de la firma *INTRA S.L. Consultores de Movilidad (Barcelona, España)*, por la oportunidad de iniciarme como consultor y poner en práctica las herramientas adquiridas en el programa.

A mis profesores, colegas y amigos de la *Universidad del Valle* (Cali, Colombia). Al *Dr. Ciro Jaramillo* y *Francisco Hernández* de la *Escuela de Ingeniería Civil* y al *Dr. Pedro Martínez* del *Departamento de Geografía*, por su decisivo apoyo al abrirme las puertas de la academia. A los profesores *Carlos Botero*, *Hilda Ortiz* y *Aurelio Solarte* de la *Escuela de Arquitectura*, por aportar a mi formación como Arquitecto-Urbanista y apoyarme en mi intención de traspasar fronteras disciplinares.

A mis colegas y amigos *Juan David González*, *Diana Mazo*, *Karen Gaviria*, *Francisco Aldana* y *Carlos D. García* del *Equipo de Planificación Integral de la Movilidad* y el *Territorio PIMOT de la Alcaldía de Cali (Colombia)* por su aliento y sus valiosos comentarios en la formulación de la aplicación práctica al caso de Santiago de Cali.

Por último, y no por ello menos importante, mi más profundo agradecimiento por su invaluable apoyo y aliento a mi familia materna: mi madre *Gloria*, y mis hermanos *María Fernanda* y *Elier Fernando*. A mi esposa *Claudia*, a mis pequeñas *Catalina* y *Celia*, por permitirme vivir la mejor etapa de mi vida con ellas. A mis viejos amigos, por estar siempre ahí, por celebrar mis pequeños y grandes triunfos como propios. A *Paula Puentes* por su incondicional apoyo para el inicio de este viaje.

A todas aquellas personas que en diferentes etapas de este proceso han sido, en lo personal y en lo profesional, decisivas para este logro, muchas gracias.

Carlos Alberto González Guzmán

## Índice

Resumen .....	i
Abstract.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Listado de figuras.....	vii
Listado de tablas .....	x
1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivos.....	3
2 ESTADO DEL ARTE .....	4
2.1 Una perspectiva amplia del estado de la cuestión .....	4
2.2 La gestión de la movilidad: Bases e instrumentos .....	12
2.3 Tarifación viaria .....	16
2.3.1 Algunas experiencias internacionales.....	20
2.3.2 Beneficios y desventajas de su implementación .....	24
2.4 Redistribución del uso del espacio viario.....	26
2.4.1 Algunas experiencias internacionales.....	32
2.4.2 Beneficios y desventajas de su implementación .....	40
2.5 Restricción viaria al vehículo privado.....	41
2.5.1 Algunas experiencias internacionales.....	42
2.5.2 Beneficios y desventajas de su implementación .....	46
2.6 Carril de alta ocupación .....	48
2.6.1 Algunas experiencias internacionales.....	50
2.6.2 Beneficios y desventajas de su implementación .....	51
2.7 Carril Bus.....	53
2.7.1 Algunas experiencias internacionales.....	57
2.7.2 Beneficios y desventajas de su implementación .....	67
3 METODOLOGÍA.....	70
3.1 La teoría microeconómica de la congestión .....	70
3.1.1 El fenómeno de la congestión desde la teoría microeconómica.....	70
3.1.2 La economía de escala en el transporte público.....	72
3.1.3 Equilibrio de reparto modal y regulación externa .....	76
3.2 La teoría clásica de la tarifa óptima.....	83
3.3 La capacidad viaria y el nivel de servicio en entornos urbanos.....	86
3.3.1 Conceptos.....	86
3.3.2 Conceptos de flujo de tráfico y capacidades .....	86

3.3.3	Parámetros básicos del flujo de automóviles.....	86
3.3.4	Relación entre parámetros básicos del modo automóvil.....	90
3.3.5	Conceptos de calidad y nivel de servicio .....	92
3.3.6	Infraestructuras viarias de flujo ininterrumpido .....	93
3.3.7	Autopistas (segmentos básicos).....	93
3.3.8	Carreteras multicarril.....	96
3.3.9	Carreteras de dos carriles.....	97
3.3.10	Infraestructuras viarias de flujo interrumpido.....	98
3.3.11	Los criterios del nivel de servicio.....	98
3.3.12	El modo automóvil.....	99
4	MODELIZACIÓN DE LA OFERTA ÓPTIMA DE VIARIO .....	101
4.1	La relación entre tarifa por congestión y reducción de oferta viaria .....	103
4.2	La penalización al vehículo privado en unidades de tiempo.....	105
4.3	La reducción de espacio viario al vehículo privado.....	111
4.4	Las bases para la implementación del Road Space Retribution Charge by Congestion Costos (SRC) .....	116
4.5	Un ejemplo numérico: Road Space Retribution Charge by Congestion Costs (SRC) en un corredor urbano congestionado .....	117
4.5.1	Introducción .....	117
4.5.2	El caso simple de dos rutas - Enfoque analítico.....	118
4.5.3	El caso simple de dos rutas - Enfoque de simulación.....	124
4.6	Alternativas de aplicación práctica del Road Space Retribution Charge by Congestion Costs (SRC) .....	128
4.6.1	SRC en un corredor urbano congestionado .....	128
4.6.2	SRC en centro urbano .....	129
4.6.3	SRC y road pricing en centro urbano.....	130
5	APLICACIÓN AL CASO DEL CENTRO HISTÓRICO DE CALI, COLOMBIA.....	132
5.1	Introducción .....	132
5.2	Santiago de Cali, Colombia .....	134
5.2.1	Localización.....	134
5.2.2	Territorio.....	134
5.2.3	Población .....	137
5.2.4	Economía.....	138
5.2.5	Movilidad.....	138
5.2.6	Centro Histórico.....	145
5.3	Objetivo.....	147
5.4	Metodología.....	147
5.4.1	Proceso metodológico.....	147
5.4.2	Datos:.....	151

5.5	Diseño y descripción de escenarios.....	152
5.6	Penalización en tiempo de viaje.....	155
5.6.1	Cálculo del costo generalizado del viaje.....	155
5.6.2	Cálculo de los costos económicos por congestión.....	160
5.6.3	Cálculo de la penalización.....	162
5.6.4	Variación de la demanda de viajes.....	163
5.7	Implementación de la Redistribución del Uso del Espacio Vario (RUEV).....	167
5.7.1	Situación actual.....	167
5.7.2	Identificación de proyectos.....	167
5.7.3	Situación futura.....	168
5.8	Análisis de escenarios.....	180
5.8.1	Listado de indicadores.....	180
5.8.2	Análisis de resultados.....	181
5.8.2.1	<i>Indicadores urbanísticos</i> .....	181
5.8.2.2	<i>Indicadores de tráfico</i> .....	187
5.8.2.3	<i>Indicadores ambientales</i> .....	191
5.8.2.4	<i>Indicadores económicos</i> .....	197
5.8.3	Selección del esquema.....	199
5.8.4	Evaluación.....	201
6	CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA.....	204
6.1	Conclusiones.....	204
6.2	Investigación futura.....	209
	Referencias.....	210



## Listado de figuras

Figura 1. Estructura y contenido .....	3
Figura 2. Modelo estándar de la tarifa óptima .....	18
Figura 3. Reasignación en una vía arteria, reduciendo número de carriles para ampliar aceras .....	27
Figura 4. Reasignación en vía local, reduciendo la calzada para crear aceras .....	27
Figura 5. Distribución de cambios en el nivel de tráfico generados por redistribución de espacio viario para los diversos casos de estudio .....	30
Figura 6. Estimación de reducción en el nivel de tráfico generado por (a) re-asignación de espacio viario de naturaleza general (a) y (b) para el caso de implantación de carril bus (b).....	30
Figura 7. Reasignación de espacio viario en Time Square, New York, EEUU.....	38
Figura 8. El modelo de las “Super-manzanas” de Barcelona .....	39
Figura 9. Carril para vehículos de alta ocupación (HOVL) en Washington, EEUU.....	48
Figura 10. Carril bus en Barcelona.....	54
Figura 11. Carril bus central. Santiago de Cali, Colombia .....	54
Figura 12. Sistema BRT (Transmilenio) de Bogotá, Colombia.....	56
Figura 13. Evolución del Sistema BRT. Curitiba, Brasil.....	58
Figura 14. Sistema “trinario” del BRT de Curitiba, Brasil.....	59
Figura 15. Carril exclusivo, bus articulado y parada “tubo” del sistema BRT de Curitiba, Brasil.....	60
Figura 16. Sistema BRT (Transmilenio) de Bogotá, fases 1, 2 y 3 .....	62
Figura 17. Sistema BRT (Transmilenio): Carriles dobles y sencillos .....	64
Figura 18. Sistema BRT (Transmilenio): Sección viaria de corredor troncal con carril doble.....	65
Figura 19. Congestión vehicular (transporte privado).....	71
Figura 20. Coste medio y coste marginal en transporte privado .....	72
Figura 21. Costos medios en transporte público .....	75
Figura 22. Equilibrio de reparto modal (sin medida de regulación externa) .....	77
Figura 23. Congestión: Equilibrio versus flujo óptimo de tráfico.....	79
Figura 24. Equilibrio de reparto modal desde la optimalidad económica global.....	80
Figura 25. Efecto de un mejoramiento en la red vial.....	81
Figura 26. Tarifación por congestión .....	82
Figura 27. Reparto modal bajo política de tarifación al vehículo privado.....	83
Figura 28. Teoría de la tarifa óptima .....	85
Figura 29. Relación generalizada entre velocidad, densidad y tasa de flujo en infraestructuras de flujo ininterrumpido.....	90
Figura 30. Nuevo diagrama fundamental de tráfico: la relación entre flujo y densidad.....	91
Figura 31. Visual de los niveles de servicio en segmentos básicos de autopista .....	95
Figura 32. Relación entre los esquemas reducción de oferta de espacio viario y tasa óptima por congestión .....	104
Figura 33. Análisis de equilibrio con curva de oferta nueva según penalización y con coste en unidades de tiempo.....	109
Figura 34. La congestión y la reducción de la capacidad viaria al vehículo privado.....	112
Figura 35. Diagrama fundamental de tráfico y reducción de capacidad viaria al vehículo privado .....	113

Figura 36. Relación entre la velocidad y el flujo, y reducción de la capacidad viaria al vehículo privado .....	115
Figura 37. Costo del viaje en el arco 1 con una oferta viaria inicial (4 carriles).....	119
Figura 38. Curvas de congestión para el arco 1 con oferta viaria inicial y final al vehículo privado .....	122
Figura 39. El tiempo de viaje y la tarifa óptima en la reducción de viajes en vehículo privado ..	123
Figura 40. Re-asignación del tráfico en la red con SRC en el arco 1 .....	125
Figura 41. Alternativas para la aplicación práctica del SRC .....	128
Figura 42. SCR en corredor urbano congestionado (arco based toll).....	128
Figura 43. SCR en centro urbano (cordon toll).....	129
Figura 44. SCR y road pricing en centro urbano (hybrid cordon toll).....	130
Figura 45. Instrumentos considerados para esquemas híbridos espacio-regulatorios .....	132
Figura 46. Localización del Municipio de Cali con respecto al Valle del Cauca y Colombia .....	134
Figura 47. Clasificación del suelo en el Municipio de Santiago de Cali .....	135
Figura 48. División administrativa: Comunas del área urbana y Corregimientos del área rural .	136
Figura 49. Distribución de las viviendas en área urbana según estrato socio-económico .....	137
Figura 50. Tasa de motorización general (vehículo particular y moto particular). (Vehículos / 1.000 habitantes) .....	139
Figura 51. Tasa de motorización de vehículo particular. (Vehículos / 1.000 habitantes).....	139
Figura 52. Tasa de motorización de moto particular. (Vehículos / 1.000 habitantes) .....	139
Figura 53. Tasa de motorización según estrato socio-económico. Año 2015. ....	140
Figura 54. Parque automotor en el Municipio de Santiago de Cali (año 2017) .....	140
Figura 55. Reparto modal de los viajes en el Municipio de Cali (Año 2015) .....	141
Figura 56. Distribución de los viajes diarios y reparto modal según estrato socio-económico en el Municipio de Cali. Año 2005. ....	142
Figura 57. Generación y atracción de viajes totales por comunas y corregimientos. ....	143
Figura 58. Atracción de viajes totales por comunas y corregimientos. ....	144
Figura 59. Concentración de empleos en Santiago de Cali: Comercio, servicios e industria.....	145
Figura 60. Localización del Centro Histórico y delimitación de la zona de análisis.....	145
Figura 61. Reparto Modal de los Viajes Hacia el Centro Histórico de Cali.....	146
Figura 62. Diagrama del proceso de la aplicación práctica .....	150
Figura 63. Simulación con SYNCHRO-SIMTRAFFIC en Centro Histórico de Cali. ....	154
Figura 64. Tasa de motorización por estratos (vehículos / 1000 habitantes) .....	164
Figura 65. Situación actual (sin proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular.....	169
Figura 66. Proyectos de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) según nivel de transformación.....	171
Figura 67. Situación futura (con proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular.....	174
Figura 68. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Carrera 4 entre Calles 14 y 15.....	176
Figura 69. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Carrera 5 entre Calles 8 y 9.....	177
Figura 70. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Calle 8 entre Carreras 3 y 5.....	178

Figura 71. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Calle 10 entre Carreras 4 y 5.....	179
Figura 72. Escenario base: Kilómetros de carril por modo y corredor viario (km).....	182
Figura 73. Escenario futuro: Kilómetros de carril por modo y corredor viario (km) .....	182
Figura 74. Escenario base: Reparto porcentual de carriles por modo (%) .....	183
Figura 75. Escenario futuro: Reparto porcentual de carriles por modo (%).....	183
Figura 76. Escenarios base y futuro: Kilómetros de carril por modo (km) .....	184
Figura 77. Escenarios base y futuro: Reparto porcentual de carriles por modo (%).....	184
Figura 78. Demoras, distancias y tiempos en HMD de escenarios base y futuros .....	188
Figura 79. Velocidad promedio en HMD en escenarios base y futuros (km/h).....	189
Figura 80. Variación de indicadores de tráfico en HMD en escenario futuros (Porcentaje %) ...	189
Figura 81. Emisiones en HMD de escenarios base y futuros (gramos).....	191
Figura 82. Emisiones de HC en HMD en escenarios base y futuros (gramos) .....	192
Figura 83. Emisiones de CO en HMD en escenarios base y futuros (gramos) .....	192
Figura 84. Emisiones de NOx en HMD en escenarios base y futuros (gramos) .....	193
Figura 85. Variación porcentual de emisiones contaminantes (%) .....	193
Figura 86. Consumo de combustible en HMD en escenarios base y futuros (litros).....	194
Figura 87. Variación porcentual de consumo de combustible en HMD en escenarios futuros (%) .....	195
Figura 88. Eficiencia de combustible en HMD en escenarios base y futuros (Kilómetros por litro) .....	195
Figura 89. Costo económico por congestión en Hora de Mayor Demanda HMD en escenarios base y futuros (Millones COP).....	197
Figura 90. Variación del costo económico por congestión en HMD en escenarios futuros (%) .	198
Figura 91. Indicadores urbanísticos: Escenario Base vs Escenario Deseable.....	202
Figura 92. Indicadores ambientales: Escenario Base vs Escenario Deseable.....	202

## Listado de tablas

Tabla 1. Estrategias de gestión de la demanda de transporte (TDM).....	14
Tabla 2. Experiencias internacionales con estudios y aplicaciones de road pricing .....	21
Tabla 3. Cambios en nivel de tráfico generados por iniciativas de reasignación de espacio viario .....	31
Tabla 4. Casos de implementación de Carril HOT en Estados Unidos.....	50
Tabla 5. Criterios de niveles de servicio (LOS) con base en la densidad.....	95
Tabla 6. Niveles de servicio (LOS) en carreteras multicarril para el modo automóvil.....	96
Tabla 7. Niveles de servicio (LOS) en carreteras de dos carriles para modo automóvil.....	98
Tabla 8. Niveles de servicio (LOS) del automóvil en vías urbanas .....	100
Tabla 9. Arco 1 con oferta viaria inicial (4 carriles): Volumen de tráfico, tiempo de penalización teórico y tiempo de viaje provisional .....	121
Tabla 10. Arco 1 con oferta viaria final (3 carriles): Volumen de tráfico, tiempo de viaje y penalización real en tiempo de viaje .....	122
Tabla 11. Re-asignación del tráfico en la red con SRC en el arco 1.....	126
Tabla 12. Re-asignación del tráfico en la red con SRC en el arco 1.....	126
Tabla 13. Descripción de escenarios para la aplicación práctica caso Santiago de Cali.....	152
Tabla 14. Supuestos base para la estimación del valor subjetivo del tiempo.....	158
Tabla 15. Variación de la Demanda de Viajes en Transporte Privado.....	166
Tabla 16. Situación actual (sin proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular.....	170
Tabla 17. Listado de proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV) .....	172
Tabla 18. Situación futura (con proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular.....	175
Tabla 19. Escenario base (sin proyectos RUEV): Kilómetros de carril de la calzada vehicular por modo de transporte y corredor viario .....	185
Tabla 20. Escenario futuro (con proyectos RUEV): Kilómetros de carril de la calzada vehicular por modo de transporte y corredor viario.....	186
Tabla 21. Indicadores de tráfico en Hora de Mayor Demanda (HMD) de un día típico .....	190
Tabla 22. Indicadores ambientales en Hora de Mayor Demanda (HMD) en un día típico.....	196
Tabla 23. Costo económico por congestión en HMD (Millones COP) .....	198
Tabla 24. Penalización objetivo versus penalización resultante de cada uno de los esquemas	200

## 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 Introducción

El concepto del espacio viario urbano como un bien público y un recurso escaso que debe ser usado de manera eficiente ha tomado fuerza en los lineamientos estratégicos de movilidad sostenible de la Comunidad Europea, y paulatinamente ha venido siendo adoptado en algunas de las ciudades capitales de América Latina.

Si bien, algunos instrumentos de gestión de la movilidad como la *Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV)*, entre otros, han sido desarrollados para promover un uso más eficiente y equitativo del espacio viario urbano, otorgándole prioridad a los modos de transporte sostenible (peatón, bicicleta y transporte público) en detrimento del vehículo particular, la decisión sobre cuánto espacio viario debe ser transferido ha estado enmarcada más en el terreno de lo político que de lo técnico.

No se ha contado con una formulación teórica y metodológica que le de soporte científico a tales decisiones.

Esto evidencia la necesidad de desarrollar un instrumento alternativo de gestión de la demanda de transporte como el que propone el presente documento, que haga posible que las externalidades negativas generadas por el usuario del vehículo particular sean internalizadas por este no en términos monetarios mediante una tarifa por congestión capturada con peaje electrónico, sino en términos espaciales mediante una reducción de su espacio viario para transferirlo a los modos de transporte más sostenibles.

El presente documento desarrolla las bases conceptuales y metodológicas de un instrumento alternativo de gestión de la movilidad denominado "*Retribución de Espacio Viario según Costes Sociales de Congestión*" (en inglés, *Road Space Retribution Charge by Congestion Costs*), en adelante *SRC*, el cual ha sido desarrollado bajo un enfoque de microeconomía aplicada, tomando como referente la teoría clásica de la tarifa óptima por congestión.

El instrumento propuesto permite calcular la cantidad de espacio viario urbano actualmente usado por el vehículo privado que debe ser transferido a los modos de transporte sostenible, esto con base en una penalización en tiempo de viaje, y con el fin de lograr una internalización de los costes sociales de congestión del vehículo privado.

Los resultados del desarrollo analítico del instrumento propuesto sugieren que el inicial incremento de tiempo de viaje que experimenta el vehículo particular a consecuencia de la reducción de su espacio viario, puede favorecer una mejora de la movilidad. Esto, dado que se puede generar una reasignación más eficiente del tráfico del vehículo particular en la red y un cambio modal hacia el transporte público

y los modos no motorizados como consecuencia de sus mejoras de operación al contar con más espacio de uso exclusivo.

De igual manera, el instrumento propuesto puede lograr un mejor bienestar social con respecto a un escenario no contralado de equilibrio del usuario, y puede tener, bajo ciertas circunstancias, similares resultados a los de la tarificación viaria para el desincentivo de la demanda en vehículo particular.

Su implementación en el contexto de ciudades colombianas puede representar grandes beneficios, considerando el creciente uso del vehículo particular y las amplias externalidades negativas asociadas.

En el contexto de Colombia, la contaminación, el consumo de combustibles fósiles, la siniestralidad vial y el impacto en la salud pública, entre otros impactos negativos, justifican ampliamente la implementación de instrumentos alternativos de gestión de la movilidad.

Las emisiones por fuentes móviles del sector transporte representan un 80 por ciento del total de emisiones contaminantes en los principales centros urbanos (IDEAM, 2018). El sector transporte representa el 40 por ciento del consumo anual de energía final del país, del cual el 88% corresponde al modo carretero, y su fuente principal son los combustibles fósiles (UPME, 2016). En siniestralidad vial es el responsable de 6.850 víctimas fatales y 39.517 lesionados anuales (ONSV, 2018). Y, en salud pública, tiene una alta participación en las cerca de 15.000 muertes anuales atribuibles a factores de riesgo relacionados con la calidad del aire (ONS, 2018).

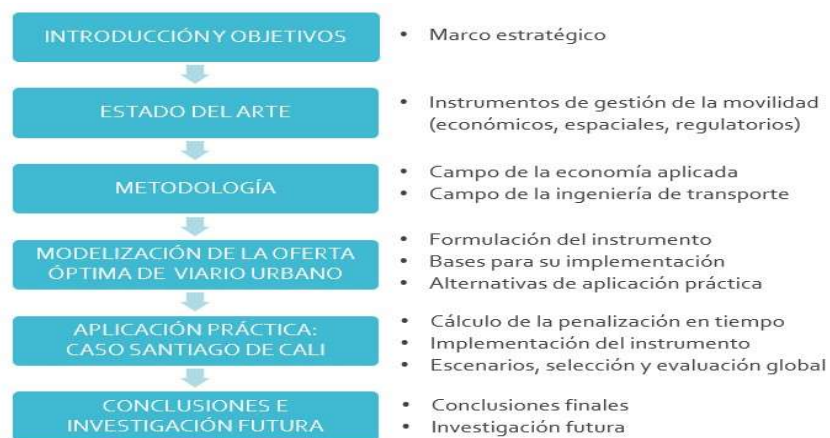
A su vez, en el contexto local, el de la ciudad de Santiago de Cali (Colombia), una ciudad con 2,2 millones de habitantes (DANE, 2018), el actual modelo de movilidad presenta diversas externalidades negativas, entre las que se incluyen los 320 muertos y 12.387 lesionados anuales en incidentes de tránsito, los 2,5 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub>, la congestión crítica en el 43% de la red vial principal y el incremento del 120% en la tasa de motorización en la última década (DAPM, 2019b).

Todos estos aspectos reflejan la necesidad de implementar instrumentos de gestión de la movilidad en ámbitos urbanos en Colombia.

El presente documento, además de formular las bases conceptuales y metodológicas de dicho instrumento, incluye la formulación y desarrollo de una aplicación práctica para el caso del centro histórico de Santiago de Cali (Colombia). Primero, se calcula la penalización en tiempo de viaje y se propone un paquete de proyectos de redistribución del uso del espacio viario para el Centro Histórico. Segundo, se evalúa el potencial impacto que este, de manera aislada o como parte de un esquema híbrido, puede tener como gestor eficiente de movilidad. Y, tercero, el esquema híbrido de “Redistribución del Uso del Espacio Viario” y “Gestión y Control del Tráfico” es seleccionado como el más adecuado para la internalización de externalidades por congestión.

La estructura del documento se desarrolla en 6 apartados principales. La introducción y objetivos que conforman el marco estratégico. El estado del arte que incluye los instrumentos de gestión de la movilidad (económicos, espaciales y regulatorios). La metodología que incluye elementos del campo de la economía aplicada y del campo de la ingeniería de transporte. La modelización de la oferta óptima de viario urbano, que incluye la formulación, las bases para su implementación y las alternativas de aplicación práctica. La aplicación práctica para el caso de Santiago de Cali. Y, finalmente, conclusiones e investigación futura.

Figura 1. Estructura y contenido



## 1.2 Objetivos

El objetivo general de esta tesis doctoral es determinar si un nivel de congestión generado para el vehículo particular mediante una redistribución del uso del espacio viario urbano, puede contribuir, y en qué medida, al fomento de los modos de transporte más sostenibles (peatón, bicicleta y transporte público), y evaluar el potencial impacto que este instrumento, de manera aislada o como parte de una estrategia mixta, puede tener como gestor eficiente de movilidad.

Para ello, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Formular las bases conceptuales y metodológicas de un instrumento de gestión de la movilidad que haga uso de la redistribución del uso del espacio vial urbano existente, sustentado en una internalización de las externalidades por congestión del vehículo particular.
- Evaluar la aplicabilidad y el potencial impacto del instrumento mediante una aplicación práctica para el caso de Santiago de Cali (Colombia).

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Una perspectiva amplia del estado de la cuestión

La discusión fundamental, al menos a nivel operativo, a la hora de hablar de una sostenibilidad en el campo del transporte urbano, debería apuntar hacia el tema del uso que se hace del espacio vial urbano, presentándose así, algunos cuestionamientos iniciales: ¿Cuánto del espacio viario de la ciudad debe asignarse al automóvil y cuánto al transporte público y los modos no motorizados?, ¿Cómo calcular dicha asignación de uso de espacio vial de una manera óptima en términos económicos, sociales y ambientales?, ¿Qué escenarios se deben generar para propiciar un uso modal más eficiente del espacio viario urbano?.

En el presente documento, la sostenibilidad de la movilidad en entornos urbanos es abordada desde la perspectiva de una distribución modal más racional y eficiente del uso del espacio viario urbano disponible

Cada vez hay más consenso a nivel internacional en lo que se refiere a que la mejora de la movilidad no debe buscarse solo a través de una mayor oferta de infraestructura vial (mediante construcción de infraestructura nueva o ampliación de la capacidad de la existente), y respecto a que las acciones de fomento del uso de los modos de transporte más sostenibles (peatón, bicicleta y transporte público) deben estar acompañados de acciones de desincentivo del uso de los modos de transporte privado (auto y moto).

Como respuesta a dicho enfoque tradicional de “planificación del transporte desde la oferta de infraestructura” que dominó durante décadas el contexto internacional, cabe resaltar el caso del Reino Unido, el cual a mediados de los años 90 presentó un cambio radical en su política gubernamental en lo concerniente a la construcción de vías. Dicha política ya apuntaba en el sentido de que la construcción de vías no era siempre una solución a la congestión, en tanto que la creación de una mayor capacidad viaria podía generar un mayor tráfico.

Este cambio se debió, en parte, a la supervisión técnica del *Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment SACTRA (DETR, 1994)* y en parte, al reconocimiento popular de que, por ejemplo, la construcción de la *Autopista M25* en los alrededores de Londres (Reino Unido) finalmente no había producido una consistente condición de flujo libre (flujo sin presencia de congestión), aun cuando esta había sido construida con una excesiva capacidad adicional respecto a las condiciones de tráfico anteriores a su construcción.

A consecuencia de lo anterior, aparece la “*Gestión de la Demanda de Transporte*” (en inglés, “*Transportation Demand Management - TDM*”) o “*Gestión de la Movilidad*” (en inglés, “*Mobility Management*”) como una línea de trabajo alternativa que aborda la planificación de la movilidad desde la perspectiva de cómo influir en el comportamiento de viajes. Se actúa sobre la demanda mediante el uso de diversos instrumentos y estrategias que buscan condicionar la elección de viaje en



sus diferentes aspectos: modo de transporte, hora de desplazamiento, longitud de los desplazamientos, frecuencias de viaje, etc. Esto con el fin de incrementar la eficiencia de la movilidad urbana en su conjunto, con criterios de sostenibilidad que involucran la reducción de externalidades negativas como lo son la contaminación ambiental, la siniestralidad vial y el consumo de recursos, entre otros.

Así, en el marco de la TDM, y entendiendo la infraestructura viaria urbana como un recurso escaso y costoso del que debe hacerse el uso más racional y eficiente posible, cobra especial relevancia el tema de dar prioridad a los modos de transporte más sostenibles. No obstante, a pesar del creciente interés de las administraciones locales por avanzar en este sentido, dicho interés apenas se ha traducido en unos pocos casos de implementación práctica de carácter significativo.

Hasta el momento no se cuenta con un instrumento con rigurosas bases conceptuales y metodológicas que posibilite el cálculo del porcentaje óptimo de espacio viario urbano del vehículo privado que debería ser transferido a los modos de transporte más sostenibles. De momento, lo que existe son ejercicios con base en la reivindicación de derechos del peatón, el ciclista y el transporte público, pero que no han estado acompañados de instrumentos metodológicos, con lo cual un segmento de los ciudadanos tiene la percepción de que no hay una justificación técnica sólida que respalde a la administración local en su decisión ni en la cantidad de espacio que se decide reducir al automóvil y del que siempre había disfrutado.

La reducción del espacio viario al vehículo privado para ser transferido al transporte público y otros modos no motorizados puede ser justificada de manera sólida a partir de un instrumento que permita que la medida y la manera en que dicha transferencia de espacio viario se lleva a cabo es equivalente a la internalización de la externalidad negativa generada por el vehículo privado.

El desarrollo de un instrumento como este sería una valiosa contribución para la toma de decisiones por parte de la autoridad local de transporte y aportaría mayores luces para establecer si las actuales iniciativas implementadas bajo otras perspectivas corresponden o no a las necesarias. Esto desde un punto de vista de optimalidad del sistema de transporte en su conjunto y en el marco de lograr un mayor bienestar social, entendiendo a este último en función de la reducción de los efectos negativos derivados del tráfico motorizado.

Con el fin de aportar en este sentido, el presente documento desarrolla las bases conceptuales y metodológicas de la Retribución de Espacio Viario según Costes Sociales de Congestión (en inglés, *Road Space Retribution Charge by Congestion Costs*), en adelante SRC, como instrumento alternativo de gestión de la movilidad que da prioridad al transporte público y los modos no motorizados (caminar y bicicleta) en el uso del espacio viario urbano disponible, en detrimento del espacio al vehículo privado, y mediante el uso del nivel de congestión como regulador de un reparto modal más eficiente de los viajes en la red viaria urbana.

Este instrumento alternativo, al igual que los diversos instrumentos de gestión de la movilidad, busca actuar sobre la demanda de viajes, pero en su caso particular, lo

hace desde un replanteamiento de las características de la oferta vial disponible. Dicho replanteamiento de la oferta vial se realiza no para el incremento de ésta como en el enfoque tradicional de planificación del transporte, sino por el contrario, para la racionalización de su uso en favor de los modos de transporte más sostenibles.

Nuestras ciudades se enfrentan a una nociva tendencia en la cual se ha venido dando una progresiva substitución de los viajes en transporte público para ser realizados en transporte privado. Dicho progresivo cambio en la elección modal contribuye a la congestión dado que, aunque el número total de viajes se mantenga constante, se genera un aumento del número de vehículos que circulan por la red viaria urbana. Es claro que no solo los ocupantes de unos veinticinco automóviles pueden ser movilizados con mayor eficiencia en un solo autobús, sino que la ocupación de espacio viario es significativamente menor.

La situación anterior plantea una importante complejidad dado que las libres decisiones individuales en cuanto a la compra y el uso del transporte privado, entran en conflicto con el bienestar colectivo, ya que las externalidades negativas que genera el transporte privado superan ampliamente las del transporte público. Y, en términos más concretos, el transporte privado requiere de más espacio en la red viaria y genera más contaminación por pasajero transportado que el transporte público, lo que plantea desde el punto de vista social una necesidad sentida de desarrollar instrumentos de gestión del espacio viario urbano, para dar prioridad a los modos más sostenibles.

En las recientes décadas, inicialmente usando la primera preferencia (*first best*) como sistema tarifario, se ha desarrollado y consolidado la teoría de las tarifas de congestión. Esto a partir de considerar que el equilibrio entre oferta y demanda de tráfico no es óptimo porque los usuarios del automóvil no perciben ni internalizan todos los costes que generan.

En este sentido, la introducción de una tarifa de congestión (en la práctica materializada como un peaje urbano de cobro electrónico por usar el vehículo privado en una vía o una zona específica) ha permitido que el usuario del vehículo privado perciba la totalidad de sus costes marginales sociales y no solo los costes medios privados. Con lo cual se realiza una internalización de sus externalidades negativas, aspecto que en el análisis económico es señalado como el óptimo desde una perspectiva de eficiencia económica.

Desde la óptica de la teoría económica se ha defendido extensamente el uso de los precios como el mecanismo que garantiza un uso eficiente de la infraestructura.

Después del trabajo pionero de [Pigou \(1920\)](#), autores como [Walters \(1961\)](#) y [Vickrey \(1963\)](#) sentaron las bases para la fijación de un impuesto por el uso de la infraestructura de acuerdo con los costes de congestión. Más recientemente esta idea ha vuelto a cobrar fuerza en múltiples trabajos tanto teóricos como empíricos: [Newbery \(1990\)](#), [Hau \(1992, 2005a, 2005b\)](#), [Small \(1992\)](#), [Small y Gómez-Ibáñez \(1998\)](#), [Nash et al. \(2000\)](#), [Nash y Sansom \(2001\)](#), y [De Borger y Proost \(2001\)](#),

entre otros; y ha sido la política defendida por la Comisión Europea desde hace unas tres décadas: [EC \(1995, 1998, 2001\)](#).

Así la tarifa de congestión ha ganado gran importancia como un efectivo instrumento de gestión de la congestión para lograr diversos objetivos tales como la reducción de emisiones y la promoción de mejoras en el transporte público ([Yang y Zhang, 2002](#); [TfL, 2005](#)).

Dado lo anterior, el peaje urbano que materializa la tarifa de congestión, entendido como el cobro electrónico de una tarifa por circular por ciertas zonas o vías del interior, se presenta como una opción competitiva para aliviar la congestión de tráfico en áreas urbanas. A pesar de ello, los estudios e intentos de probarlo inicialmente tuvieron poco éxito lográndose implantar únicamente en Singapur en 1975, y posteriormente en algunas pocas ciudades se aplicaron sistemas de tarifas en condiciones menos severas.

El tema de la tarifa de congestión no se había vuelto a considerar ampliamente hasta finales de los años ochenta, cuando pasada la crisis económica y la estabilización del tráfico, el crecimiento de la motorización y de la movilidad en los países europeos, agravaron los problemas de congestión urbana en las grandes ciudades. Así, se presentaron nuevas y relevantes aplicaciones, entre las que la más destacada es la implantada en la ciudad de Londres en el año 2003, para el acceso de vehículos privados al centro de la ciudad.

Retomando el nivel teórico, es importante anotar que, en lo referente a la estructura matemática que sustenta el cálculo de la tarifa de congestión, desde la perspectiva del bienestar social, si no se cuenta con los instrumentos adecuados es posible que la solución óptima de primera preferencia (*first best*), en la que el precio –tarifa- es igual a los costos marginales sociales, conduzca a un sistema de producción con pérdida. [Vivas \(2004\)](#).

Esta precisión es importante dado que desde una perspectiva más amplia, la presencia de costes externos como la congestión -al igual que la siniestralidad vial o la contaminación del aire entre otros- hace que la función de coste generalizado de viaje varíe a lo largo del día, y en efecto surge entonces la pregunta de ¿Cuál es el sistema óptimo de priorización? es decir, ¿Cuál es el sistema de fijación de precios apropiado que debe servir como soporte para la penalización al uso del transporte privado, y la consecuente priorización del transporte público?. En el presente documento dicha reflexión se deja planteada para posteriores desarrollos sobre esta línea de trabajo.

De la misma manera, en lo que respecta a los sistemas de fijación de precios, una revisión de la literatura reciente, [Matas \(2004\)](#), permite concluir que un sistema óptimo de precios da lugar a importantes ganancias de bienestar, sin embargo, un determinado sistema de precios óptimos podría incurrir en unos costes de transacción excesivos y requerir tecnología que no está disponible. Afortunadamente, la evidencia empírica también es concluyente al afirmar que un sistema de precios más simple sigue generando aumentos de bienestar. Así, el

mecanismo de precios óptimo dependerá del nivel de los costes externos y de las características del área urbana.

Cabe anotar que la solución óptima de primera preferencia (*first best*) es principalmente teórica, dada la dificultad de su aplicación en la práctica (Small and Verhoef, 2007). Entre las principales barreras se encuentra la imposibilidad de tarifificar la totalidad de las vías de la red dado su alto costo (Verhoef, 2002), la dificultad para implementar un cobro dinámico a través del tiempo, la dificultad de diferenciar entre tipos de usuarios (Koster et al., 2018) y la naturaleza estocástica de la congestión (Small and Verhoef, 2007).

Otras soluciones de segunda preferencia (*second best*), facilitan la implementación práctica de mecanismos de tarificación vial mediante la imposición de restricciones. Se destacan entre estos los cordones de peajes, restricción de ingreso por zonas, entre otros (Small and Verhoef, 2007). De igual manera, se han formulado medidas híbridas de internalización de los costos sociales que incluyen esquemas de restricción de circulación vehicular y pagos monetarios (Daganzo, 1995).

Es importante destacar que no obstante su coherencia técnica y suficiente fundamentación teórica, la implantación de la tarifa por congestión significa una alta reticencia por parte de los ciudadanos por tratarse de una penalización monetaria. Esto implica un alto costo político para los tomadores de decisiones que se sienten poco motivados a implementarlas en sus ciudades y prefieran obviar la discusión sobre sus reales aportes a la mejora de la movilidad.

Todavía se cuenta con un limitado número de casos significativos de implementación de este tipo de medidas, dado su alto costo político (De Borger and Proost, 2015) y la falta de apoyo de los usuarios ex-ante (Borjesson et al., 2012). No obstante, hay casos donde el apoyo de la ciudadanía ha mejorado luego de la implementación, como Estocolmo (Eliasson and Jonsson, 2011).

Diversos autores tales como Rentziou et al. (2011), Ison y Rye (2005) y Cain (2005) muestran que el ganar aceptación pública sigue siendo la mayor barrera para implementar esquemas de tarifa por congestión en entornos urbanos. Esta es una de las razones prácticas por las cuales se han venido explorando diversos instrumentos alternativos de gestión de la congestión como lo son las estrategias de redistribución del uso del espacio viario.

En este sentido, Pulichino y Coughlin (2005) hace énfasis en la necesidad de implementar políticas innovadoras para dar prioridad a los sistemas de transporte público, y de esta manera tratar de mitigar la creciente congestión de tráfico en entornos urbanos. Dicha mejora de la movilidad urbana es realizada mediante la oferta de competitivos niveles de servicio en transporte público a partir de horarios ajustados y altas velocidades comerciales, entre otros aspectos operacionales, para atraer a más usuarios desde el vehículo privado. Una investigación realizada sobre once casos de estudio en ciudades de Europa, Norteamérica y Suramérica muestra que la oposición a las iniciativas de dar trato preferencial al transporte público no ha

sido ejercida por el público general, sino por influyentes grupos con intereses particulares.

Una revisión hecha por [Johnston, Lund y Craig \(1995\)](#) sobre una variedad de métodos propuestos para distribuir el uso de infraestructura viaria existente para reducir la congestión, muestra que, aunque la equidad y la eficiencia son criterios importantes para tal distribución, se plantean serias dificultades, y que la potencial capacidad para ahorrar costos que se puede lograr con métodos de distribución puede ser considerable. Dichos métodos de asignación pueden aplanar los períodos punta de tráfico, hacer un uso más eficiente de la capacidad viaria existente, evitar la construcción de nueva infraestructura viaria que sería usada sólo durante unas pocas horas al día. De manera alternativa, las técnicas de distribución pueden funcionar como mercados de precios para asignar un recurso escaso por medio de incentivos para aplazar, fusionar o eliminar viajes discrecionales.

Las iniciativas de reasignar espacio viario del tráfico mixto para mejorar las condiciones de los sistemas de transporte público, los peatones y los ciclistas son a menudo objeto de predicciones de que generará un mayor efecto negativo en los problemas de tráfico en las calles del sector de intervención. Un detallado estudio que cubre cerca de 70 casos de iniciativas de redistribución del espacio viario del vehículo privado (involucrando iniciativas de 11 países y entrevistas con 200 expertos de transporte) reportado por [Cairns, Atkins y Goodwin \(2002\)](#), [Cairns, Hass-Klau y Goodwin \(1998\)](#) and [MVA \(1998\)](#), sugiere que tales predicciones son innecesariamente pesimistas y que, dadas las circunstancias locales, se pueden presentar significativas reducciones en el conjunto del nivel de tráfico.

Dicho estudio precisa también que el rango de respuestas de comportamiento de los usuarios frente al nuevo escenario es muy amplio, y que este supera las limitadas asunciones de respuesta tradicionalmente contempladas. Así, en presencia de esquemas de redistribución de espacio viario bien diseñados y bien implementados en entornos urbanos, los niveles de tráfico pueden ser reducidos de manera significativa, en un promedio de 11% en la vía o el área intervenida. Además, estos esquemas pueden contribuir a lograr una amplia gama de beneficios que incluyen reducción de siniestralidad vial, mejoras en la calidad del aire, incremento de las inversiones en las zonas comerciales, entornos residenciales y laborales más atractivos y mejora de la actividad comercial en zonas estratégicas.

Todo lo expuesto anteriormente, evidencia la necesidad de desarrollar un instrumento alternativo de gestión de la demanda de transporte como el que propone el presente documento, que haga posible que las externalidades negativas generadas por el usuario del vehículo particular sean internalizadas por este no en términos monetarios mediante una tarifa por congestión capturada con peaje electrónico, sino en términos espaciales mediante una reducción de su espacio viario para transferirlo a los modos de transporte más sostenibles.

González-Guzmán y Robusté (2011) plantean una penalización al vehículo particular en función de los costos sociales de congestión a través de una reducción de su espacio viario. Primer avance y parte integral de esta tesis doctoral.

Su implementación en el contexto de ciudades colombianas puede representar grandes beneficios, considerando el creciente uso del vehículo particular y las amplias externalidades negativas asociadas.

En el contexto de Colombia, las emisiones por fuentes móviles del sector transporte representan un 80% del total de emisiones contaminantes en los principales centros urbanos (IDEAM, 2018). El sector transporte representa el 40% del consumo anual de energía final del país, del cual el 88% corresponde al modo carretero, y su fuente principal son los combustibles fósiles (UPME, 2016). En siniestralidad vial es el responsable de 6.850 víctimas fatales y 39.517 lesionados anuales (ONSV, 2018). Y, en salud pública, tiene una alta participación en las 15.000 muertes anuales atribuibles a factores de riesgo relacionados con la calidad del aire (ONS, 2018).

A su vez, en el contexto local, el de la ciudad de Santiago de Cali (Colombia), una ciudad con 2,2 millones de habitantes (DANE, 2018), el actual modelo de movilidad presenta diversas externalidades negativas, entre las que se incluyen los 320 muertos y 12.387 lesionados anuales en incidentes de tránsito, los 2,5 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub>, la congestión crítica en el 43% de la red vial principal y el incremento del 120% en la tasa de motorización en la última década (DAPM, 2019b).

Todos estos aspectos reflejan la necesidad de implementar instrumentos de gestión de la movilidad en ámbitos urbanos en Colombia. El presente documento, además de formular las bases conceptuales y metodológicas de dicho instrumento, incluye una aplicación práctica para el caso de Santiago de Cali (Colombia).

Las metodologías e instrumentos disponibles para el análisis de corredores y redes complejas de transporte incluyen enfoques analíticos y de simulación. En lo que respecta a sistemas unimodales, hay un importante desarrollo para análisis de un único corredor y recientemente se han ampliado las opciones para análisis a nivel de redes más complejas, en particular para la modelación de la congestión de tráfico en redes destinadas a vehículos particulares.

En lo que respecta a congestión y operaciones de tráfico en un corredor individual hay una literatura extensa. Las colas se desarrollan en los embotellamientos cuando la demanda de vehículos excede la capacidad de la vía, la dinámica de este sistema se puede modelar con teoría de onda cinemática (Lighthill y Whitham, 1955; Richards, 1956) y teoría de colas (Newell, 1971). Estos métodos describen la naturaleza dinámica del tráfico de automóviles en una carretera, y por lo tanto se puede utilizar para modelar la evolución de las colas en el tiempo en respuesta a una demanda exógena.

También se han desarrollado modelos económicos para modelar el equilibrio del usuario y patrones de viaje óptimos del sistema que tienen en cuenta la dinámica

de la congestión en un embotellamiento. El problema del viaje diario por la mañana para un único modo se introdujo en [Vickrey \(1969\)](#) que considera una población de viajeros en automóvil que deben usar una sola ruta con un cuello de botella de capacidad fija para ponerse a trabajar en el momento deseado. Cuando la demanda supera la capacidad del tramo congestionado no es posible que todos viajen a tiempo, por lo que cada uno elige cuándo viajar para minimizar la suma de su propio costo de viaje, retraso y penalización asociados con la desviación del horario. Un único equilibrio del usuario existe incluso para una población con una distribución general de los horarios de salida ([Hendrickson y Kocur, 1981](#); [Smith, 1984](#); [Daganzo, 1985](#)). El modelo del corredor congestionado y viaje diario al trabajo por la mañana se ha estudiado ampliamente para el caso en el que todos los viajeros son idénticos y desean salir a la misma hora ([Arnott et al., 1990b](#); [Arnott et al., 1993](#)).

En otros casos, y de manera más reciente, desde la perspectiva de la simulación microscópica del tránsito para corredores urbanos específicos, autores como [Noland et al. \(2015\)](#), analizan la reducción del espacio viario destinado al vehículo particular en términos del impacto en la reducción de colisiones de tránsito.

En lo que respecta a la modelación de redes urbanas, se han realizado avances recientes en cuanto a redes para automóviles, estimaciones para una física de tráfico realista. Se ha demostrado tanto teóricamente ([Daganzo y Geroliminis, 2008](#)) y empíricamente ([Geroliminis y Daganzo, 2008](#)) que existe una relación consistente entre el flujo promedio de vehículos en una red y la densidad promedio de vehículos. Esta relación se llama Diagrama Fundamental Macroscópico (MFD).

El MFD tiene una ventaja sobre enfoques más desagregados para modelar redes de tráfico, porque esta relación depende sólo de las características de la red y es insensible a los detalles de las tablas de origen-destino que son difícil de lograr. ([González, 2011](#)).

Aunque el problema de los viajes diarios de la mañana ha sido estudiado para redes muy simples con rutas paralelas entre un origen y un destino ([Arnott et al., 1990a](#)), una importante extensión del modelo del corredor congestionado es el problema de los viajes diarios en redes urbanas donde los orígenes y destinos se distribuyen a través del espacio. [Geroliminis y Levinson \(2009\)](#) emplea un método macroscópico para analizar el equilibrio de usuario y examina estrategias de tarificación para el problema de los viajes diarios de la mañana para una ciudad con el transporte particular como único modo de transporte.

Diversos autores presentan avances en la comprensión de la relación física entre la estructura de la ciudad, el transporte y los costos de proveer accesibilidad, aplicada a redes urbanas y múltiples modos de transporte. Con dicho enfoque macroscópico, [González \(2011\)](#) busca la asignación modal del espacio viario en términos de una minimización del costo total de sistema, mientras [Zheng y Geroliminis \(2013\)](#) lo hace en términos de minimización de horas totales de viaje.

## 2.2 La gestión de la movilidad: Bases e instrumentos

La Gestión de la Movilidad, también denominada como Gestión de la Demanda de Transporte (en Inglés, “*Mobility Management*” o “*Transportation Demand Management*”), a la cual en adelante nos referiremos como TDM, se refiere a varias estrategias orientadas a cambiar el comportamiento de viajes (cómo, cuándo y dónde viaja la gente) con el fin de incrementar la eficiencia de la movilidad y lograr objetivos específicos como la reducción de la congestión, ahorro de costos viarios y de aparcamiento, incremento de la seguridad viaria, mejora de la movilidad de personas no-conductoras, conservación de la energía y reducción de las emisiones contaminantes.

Existen diversas estrategias TDM con una variedad de impactos. Algunas mejoran las opciones de transporte disponibles, mientras otras proveen un incentivo para el cambio modal, la hora o el destino de viaje. Algunas reducen la necesidad del viaje físico a través de substitutos de movilidad o mediante esquemas de uso del suelo más eficientes que reducen número de viajes en distancia de los mismos.

La Gestión de la Movilidad, se define como “el arte de influenciar el comportamiento de los viajeros, con el propósito de reducir o redistribuir la demanda de viajes” (VTPI, 2018). El principal propósito de las estrategias TDM es reducir el número de vehículos usando las vías disponibles, a la vez que se promueve una amplia variedad de opciones de movilidad para quienes desean viajar.

En múltiples ciudades del mundo, los problemas del transporte han sido usualmente evaluados en términos de la oferta, lo que implica medidas de acción enfocadas a la construcción de más vías o el aumentado de la capacidad de estas (incremento del número de carriles), evidenciando serias dificultades para dar respuesta a los problemas de movilidad de la ciudad, y en muchos casos incrementando la intensidad de sus externalidades negativas: contaminación, ruido, accidentalidad, etc.

A pesar de la inercia de múltiples administraciones locales, en algunas otras gradualmente se ha venido utilizando de manera creciente soluciones de gestión a partir de estrategias TDM, lo cual ha representado un avance en la búsqueda de nuevos enfoques para afrontar los problemas de movilidad urbana.

A nivel general, el mayor énfasis de la TDM tanto en sus estrategias como en sus acciones, está en la reducción de vehículos circulando por la red viaria y en un incremento de su eficiencia operativa mediante el aumento de la ocupación de dichos vehículos. Estas fijan su mayor atención en aquellos viajes denominados como pendulares que se relacionan con los lugares de residencia y/o trabajo, dado su mayor carácter predecible como parte de un patrón de movilidad, que puede ser influenciado tanto directamente en el conductor, como indirectamente por determinaciones al respecto en su lugar de trabajo.



El objetivo general de las estrategias TDM es por tanto alcanzar un tipo de movilidad más sostenible. Esto implica el estar seguros de que las necesidades existentes en relación a la movilidad de las personas y de las organizaciones, incluyendo las necesidades del transporte de mercancías, quedan cubiertas, al mismo tiempo que se cumplen los objetivos en cuanto a la integridad medioambiental, la igualdad social y la eficiencia económica. (E.C. 2003)

Todo esto se puede ampliar mediante la exposición de varios objetivos concretos:

- Fomentar un cambio de actitud y de comportamiento con el objetivo de hacer un mejor uso de los medios de transporte sostenibles, como, por ejemplo, el transporte público, los desplazamientos a pie, el uso de la bicicleta y las combinaciones intermodales
- Mejorar el acceso (sostenible) para cualquier persona y para las instituciones, fortaleciendo las condiciones necesarias para la utilización de los medios de transporte sostenible
- Satisfacer las necesidades de movilidad por medio de un uso más eficiente e integrado del transporte y de la infraestructura terrestre ya existente
- Reducir el tráfico limitando para ello el número, la distancia y la necesidad de los desplazamientos en vehículos motorizados
- Mejorar la cooperación entre los distintos medios de transporte y facilitar la interconexión y la colaboración entre las redes de transporte ya existentes
- Incrementar la eficiencia económica de todo el sistema de transportes

Un aspecto clave de las estrategias TDM, es que el desarrollo efectivo de un programa de actuación debe ser enfocado a partir de cómo los líderes de la comunidad involucrada, el gobierno local y los empleadores pueden trabajar de manera conjunta para alcanzar los objetivos de proveer una movilidad más sostenible.

El siguiente cuadro presenta una revisión general de las diversas estrategias existentes, las cuales se han seleccionado en función de su pertinencia para el ámbito aquí tratado que corresponde al transporte urbano. Las estrategias se han organizado en tres grandes grupos, de acuerdo a la manera en que estas impactan la demanda de viajes.

Tabla 1. Estrategias de gestión de la demanda de transporte (TDM)

<b>Mejora de las opciones de transporte</b>	
Horarios laborales alternativos	Flexibilidad en el horario laboral para reducir el número de empleados entrando y saliendo al mismo tiempo
Sistema de bus de altas prestaciones. BRT	Diseño de sistemas de bus de altas prestaciones con significativa mejora de la calidad y la coste eficiencia
Mejoras al modo bicicleta	Estrategias para mejorar la movilidad en bicicleta
Integración bicicleta / transporte público	Diversas opciones para integrar la movilidad en bicicleta con la movilidad en transporte público
Coche en multipropiedad (Carsharing)	Servicio de coche en multipropiedad que disminuya la necesidad de propiedad de vehículo privado en los usuarios
Light Rail Transit	Sistemas ferroviarios diseñados para proveer un conveniente servicio local sobre corredores de gran movilidad.
Planificación de la movilidad no motorizada	Planeación enfocada a promover la movilidad a pie y en bicicleta.
Park & Ride	Programas para proveer aparcamientos en puntos de intercambio modal estaciones de transporte masivo.
Mejoras a los peatones	Estrategias para mejorar las condiciones de movilidad de los peatones
Ridesharing	Estrategias para animar la implantación y usos de diversos esquemas de coche compartido (carpooling-vanpooling)
Pacificación del tráfico	Diseño de vías que reduce la capacidad y la velocidad del tráfico en entornos urbanos
Mejoras al transporte público	Estrategias que promueven la mejora de los servicios de transporte público
<b>Incentivos para el uso de modos alternativos y la reducción de la conducción</b>	
Fomento a los modos a pie y bicicleta	Estrategias para estimular el uso de modos de transporte no motorizado
Tasa por congestión	Tarificación viaria usada para reducir el número de vehículos en periodo punta.
Tarificación basada en la distancia recorrida	Varias tarifas y tasas basadas en la distancia recorrida por el vehículo.
Tasas a los combustibles	Incremento de las tasas del combustible para lograr diversos objetivos.
Carril de alta ocupación (HOV)	Estrategias que dan prioridad sobre el resto del tráfico, al transporte público y a vehículos compartidos.
Tarificación del aparcamiento	Cobro monetario por el uso del aparcamiento.
Tarificación viaria	Incluye varios sistemas como tarifa por congestión, peajes de carreteras, y líneas de alta ocupación con pago.
Reasignación del espacio viario	Diseño de vías y prácticas de gestión que favorecen a los modos de mayor eficiencia.
Reducción de la velocidad	Estrategias destinadas a reducir la velocidad del tráfico en ciertas zonas de la ciudad.
Fomento del transporte público	Estrategias para estimular entre los ciudadanos un mayor uso del transporte público.
Restricciones al uso del vehículo privado	Estrategias para limitar el tráfico en ciertas horas y/o zonas.

<b>Gestión del aparcamiento y del uso del suelo</b>	
Aparcamientos de bicicletas	Aparcamientos y diversos equipamientos para promover el uso de la bicicleta.
Distritos libres de coches y calles peatonales	Diseño de zonas especiales para un uso mínimo del automóvil.
Dinamización comercial del centro de la ciudad	Dinamizar centros históricos, distritos de negocios, y barrios específicos para una mezcla de usos y actividades.
Conectividad	Crear redes viarias más conectas que fomenten una mayor accesibilidad a diferentes zonas de la ciudad y del territorio.
Agrupación de densidades de uso del suelo	Localización de destinos comunes para incrementar la accesibilidad del uso del suelo y la diversidad del transporte.
Localización eficiente de desarrollos urbanos	Localización eficiente de desarrollos urbanísticos de manera que se maximice la accesibilidad multimodal.
Nuevo urbanismo	Diseño de comunidades bajo criterios de accesibilidad y habitabilidad.
Gestión del aparcamiento	Estrategias para un uso más eficiente de la dotación de aparcamientos existente.
Tarifización del aparcamiento	Cobro monetario por el uso del aparcamiento
Aparcamiento compartido	Opciones de aparcamiento compartido entre varios usuarios.
Smart Growth (crecimiento urbano inteligente)	Prácticas de uso del suelo orientadas a crear comunidades más eficientes y habitables.
Reformas en materia de smart growth	Reformas (regulatorias y fiscales) en política y planeación que estimulan el crecimiento inteligente de las ciudades.
Mejoras en el paisaje urbano de vías	Diversos aspectos relacionados con la mejora del paisaje urbano de las calles en las ciudades.
Desarrollo urbano orientado al transporte público	Uso de las estaciones de transporte masivo como atractores para la creación de comunidades más accesibles y habitables.

*Fuente: Adaptado de TDM Encyclopedia, Victoria Transport Policy Institute*

A continuación, se presenta una revisión de los instrumentos de gestión de la movilidad que involucran aspectos de racionalización de la infraestructura viaria e internalización de externalidades, orientados a una gestión de la congestión. Los cuales guardan fuerte relación con el desarrollo conceptual y metodológico del instrumento de gestión de la movilidad propuesto aquí.

En este sentido, los instrumentos de gestión de la movilidad de mayor interés para la presente investigación son abordados con mayor detalle en los apartados siguientes, haciendo énfasis en los que se listan a continuación:

- Tarifización viaria
- Redistribución del espacio viario existente
- Restricciones al uso del vehículo privado
- Carril de alta ocupación
- Prioridad al transporte público

## 2.3 Tarificación viaria

La tarificación viaria (en inglés, *Road Pricing*) es un instrumento clave en la búsqueda de una internalización de muchas de las externalidades producidas por el sector transporte. Este instrumento consiste en el pago directo por parte de los usuarios, por el uso de una determinada vía o por conducir en un área particular. Asumiendo el espacio viario como un recurso valioso y escaso, el argumento se basa en que su uso ha de ser racionalizado por medio de un mecanismo de precios.

En el pasado las posibilidades técnicas para la tarificación viaria eran muy limitadas, pero esto ha sido superado con los sistemas de cobro electrónico, que mediante dispositivos localizados en el vehículo y/o sistemas de identificación de matrículas (o placas) permite efectuar el cobro –cargado a una cuenta bancaria– con el vehículo en movimiento.

Resulta importante considerar también que dicho instrumento se ve influenciado por otros aspectos no relacionados con la eficiencia técnico-operativa, como lo es el interés del sector público por crear nuevas fuentes de financiación a través de su recaudo, aunque la tarificación viaria no implica necesariamente un alto cargo para los conductores. De esta manera cabe diferenciar la tarificación viaria orientada hacia una gestión de la congestión de tráfico, y una tarificación viaria con fines de recaudo que normalmente está orientado a la financiación de infraestructuras.

Así, la tarificación viaria ha sido reivindicada como un elemento de la política de transporte por más de sesenta años, desde los trabajos iniciales de Vickrey en Estados Unidos US (Vickrey, 1955) y Smeed (Ministry of Transport, 1964) en el Reino Unido. Desde entonces se presentó un creciente interés en la temática, con diversas propuestas para Londres y otras ciudades del Reino Unido, la implementación del sistema en Singapur en los años 70s (que entonces no era un sistema electrónico), los estudios para la implantación de un sistema electrónico para Hong Kong y los primeros anillos de peaje en ciudades noruegas a mediados de los años 80s y una amplia revisión y publicación en la temática en el contexto estadounidense durante los años 90s. A pesar de esta considerable actividad, en la actualidad todavía son pocos los sistemas que se encuentran implantados y están en operación entre los que se citan el caso de Estocolmo 2006, Londres 2003, Singapur -transformado posteriormente a un sistema electrónico- y el de las ciudades noruegas de Bergen 1986, Oslo 1990 y Trondheim 1991, entre otros.

Los objetivos de tarificación viaria han tenido variaciones durante este largo periodo, estos han estado basados en la optimalidad económica, la mejora ambiental, el incremento del recaudo y, recientemente, han adoptado multi-objetivos en los que el de mayor interés es la reducción de la creciente

congestión (May y Milne, 2000). En dicha evolución de objetivos se pueden identificar cuatro fases.

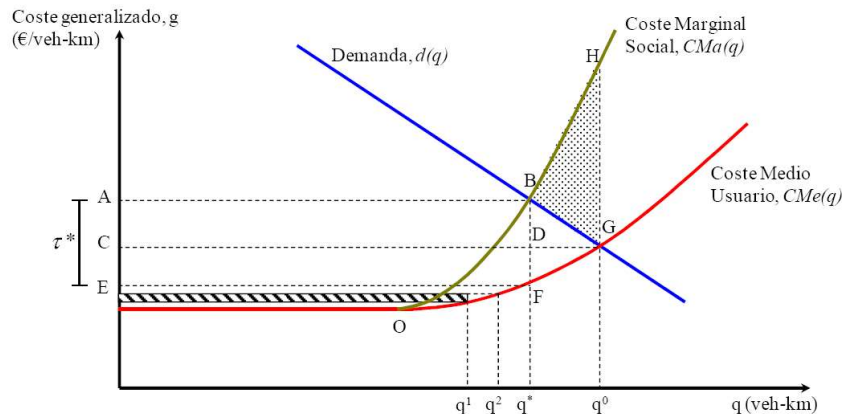
- En un primer momento la motivación fue de orden económico (optimalidad económica), guardando relación con la eficiencia con la cual las vías congestionadas eran usadas (Vickrey, 1955; Ministry of Transport, 1964). La tarificación viaria mediante la aplicación de una tasa equivalente a la diferencia entre los costos marginales sociales y los costos medios privados del viaje, fue diseñada para asegurar que los únicos conductores usando la vía fueran aquellos para quienes realmente el beneficio de usarla excediera el costo que estos imponían sobre sí mismos y sobre el resto de usuarios. Como resultado de esta acción, los flujos se verían reducidos y por tanto las velocidades de viaje serían mayores al igual que la fiabilidad respecto a los tiempos esperados de viaje.
- En segundo lugar, la tarificación viaria también ha sido vista como un instrumento para reducir los diversos impactos ambientales generados por el tráfico. Algunos de estos impactos están directamente relacionados con el flujo de tráfico, y se verán reducidos en tanto el flujo decrezca como respuesta a la implementación de la medida tarifaria. Otros impactos, tales como el ruido, las emisiones de monóxido de carbono y la contribución urbana a la producción de dióxido de carbono, están relacionadas con el nivel de congestión, y serán reducidas más eficientemente por los sistemas de tarificación viaria, dado que estos abordan directamente el problema de la congestión (RCEP, 1994). Sería posible, en teoría, agregar el costo marginal ambiental a la tarifa establecida como tarificación viaria, y de esta manera asegurar que los conductores que usen la vía sean solo aquellos cuyo beneficio de hacerlo exceda la suma de los costos por congestión y ambientales que imponen a los otros viajeros (Button, 1991).
- En tercer lugar, se hizo énfasis en un objetivo claramente diferente de los anteriores, orientado a lograr un incremento del recaudo. Es claro que la tarificación viaria puede ser una importante fuente de recaudo, por ello, los anillos tarifarios planteados en las ciudades noruegas estaban orientados a la generación de recaudo que permitiera ayudar a la financiación de la infraestructura de transporte. Sin embargo, el diseño de un esquema de tarificación viaria orientado a maximizar el recaudo es significativamente diferente de uno destinado a maximizar la eficiencia económica, dado que este último busca una reducción del uso del vehículo privado, mientras que en el primero el éxito de la medida depende del mantenimiento del flujo de vehículos que pagan la tarifa. Esto en parte explica por qué la elasticidad al precio en los anillos tarifarios de las ciudades noruegas, orientadas a la maximización del recaudo, han sido mucho más bajas que en el sistema tarifario de Singapur, orientado a la reducción de la congestión. (May, 1994).

- Por último, se ha optado por combinar dichos objetivos, mediante el análisis del papel que tiene la tarificación viaria como parte de una estrategia integral, en la cual ésta contribuye directamente a la reducción de la congestión y la contaminación ambiental, buscando de manera simultánea reducir el uso del vehículo privado y proveer financiación para alternativas al uso generalizado del vehículo privado (May y Roberts, 1995).

El tradicional enfoque económico de la congestión se sustenta en el argumento de que la congestión como un fallo de mercado requiere de la aplicación de una tarifa para internalizar la externalidad. Una vez el tráfico crece por encima de un nivel moderado, cada nuevo usuario de la red ralentiza a los demás usuarios de la red imponiéndoles costes externos que no son tenidos en cuenta en el cálculo de costo-beneficio privado de la elección de viaje. De esta manera, una tarifa por el uso de la red puede lograr desanimar el uso excesivo de la red viaria, pero es un instrumento burdo dado que puede tarificar en exceso vías poco congestionadas mientras aplica tarifas insuficientes en vías de zonas urbanas de mayor congestión. (Santos y Newbery, 2001).

En teoría, la tarifa óptima ideal o de primera preferencia (*first best*) que actuaría como medida correctiva sería igual a la diferencia entre el costo marginal social y el costo medio privado sobre cada arco de la red y cada intersección implicada, para un tráfico en un punto de equilibrio dado.

Figura 2. Modelo estándar de la tarifa óptima



La dificultad evidente en este modelo ideal es que la tarifa eficiente podría variar para cada arco, intersección y hora del día; y esto haría imposible a los conductores hacer elecciones eficientes. Aun cuando fuera posible calcular estas tarifas ideales y anunciarlas –con anticipación o en tiempo real– a los potenciales usuarios, su resultado favorable en un análisis coste-eficiencia quedaría en entredicho y con ello su factibilidad de implementación.

Cabe anotar que, respecto al enfoque de evaluación con análisis coste-eficiencia de su implementación, es fundamental asumir la idea de que los costes de implantación y operación de sistemas de tarificación por uso de la infraestructura sean asumidos por las administraciones locales como un gasto público (al igual que se hace con la oferta viaria), y no obedezcan solo a criterios de coste-eficiencia en términos de que estos necesariamente tengan que ser cubiertos con el recaudo generado.

Retomando la estructura de cálculo de una tarifa ideal o de primera preferencia (*first best*) y su dificultad de implementación práctica, aún si se optara por una tarifa que internalice solo parte del total de los costes sociales producidos por el vehículo privado, seguirían siendo considerables los requerimientos computacionales para establecer dicho coste para cualquier modelo realístico de una red urbana congestionada.

Sin embargo, es razonablemente sencillo computar el segundo mejor nivel de tráfico que puede ser soportado por un conjunto de viaje basado en tarificación viaria, si nos conformamos con encontrar qué reducción uniforme en el número de viajes entre cada origen y cada destino maximiza el bienestar social. Esto es, a nivel metodológico, una relajación de la solución de primera preferencia hacia una solución de segunda preferencia (*second best*). (Santos y Newbery, 2001)

Así, si bien la solución de primera preferencia es la pionera en la formulación teórico-matemática del cálculo de la tarifa óptima y resulta suficiente para casos sencillos de dos rutas, es la solución de segunda preferencia la que se emplea de manera práctica para casos de redes complejas.

La implementación de la tarificación viaria puede ser realizada tomando como referencia un punto para aplicar la tasa a los conductores del vehículo privado, es decir, utilizando un cordón de tarificación (*cordon pricing scheme*).

Esto puede ser hecho de manera simple, delimitando un cordón y aplicando la tasa a los conductores en una única dirección como en el caso de Singapur (Holland y Watson, 1978) y Noruega. También es posible establecer una compleja serie de pantallas y cordones, aplicando tasas que varían según la dirección en la que se desplacen los vehículos o la hora del día en que realicen el desplazamiento.

Aún en su implementación más compleja, los esquemas de cordón de tarificación son objeto de múltiples críticas. Se argumenta que son inflexibles pues los puntos de control no pueden ser fácilmente relocalizados ante un cambio de las condiciones; inequitativas pues imponen la misma tarifa tanto a trayectos cortos como largos dentro del área de regulación; y perjudiciales pues pueden aumentar la congestión en las vías localizadas en el límite del área de regulación. (Oldridge, 1990).

En respuesta a dichas críticas, se han desarrollado otros tres esquemas de tarificación viaria. Estos aplican tarifas en un área definida, basadas en el tiempo

de viaje (*time-based pricing scheme*); el tiempo gastado en congestión (*congestion pricing scheme*); y distancia de recorrido (*distance pricing scheme*).

La tarificación basada en el tiempo de viaje (*time-based pricing*) al igual que la basada en el tiempo de congestión (*congestion pricing*), han sido recomendadas como las más directamente relacionadas con la contribución que hacen los vehículos a congestión y por consiguiente con diversos impactos ambientales (Oldridge, 1990).

Sin embargo, hay preocupación de que tales esquemas serían impredecibles, y hay evidencia de que esos esquemas podrían animar una conducción arriesgada (Bonsall y Palmer, 1997); motivo por el cual dichos esquemas tarifarios fueron descartados en el estudio que se hizo para Londres (Richards et al, 1996).

Algunos autores como May y Milne (2000) sostienen que la tarificación basada en la distancia de recorrido (*distance pricing*) podría evitar estas dificultades –al igual que las que presenta el *cordon pricing*–, y fundamentan su postura argumentando que dicho esquema fue testeado indirectamente en el estudio de Londres (Richards et al, 1996).

### ***2.3.1 Algunas experiencias internacionales***

A pesar del desarrollo de diversos esquemas tarifarios como los enunciados anteriormente (*cordon pricing*, *time-based pricing*, *congestion pricing*, *distance pricing*), es el *cordon pricing* el que ha sido el de mayor implementación (mostrando diversos grados de complejidad), en parte por las fuertes limitantes tecnológicas de los otros sistemas que implican una serie de dispositivos a bordo del vehículo para medir aspectos como su tiempo de desplazamiento o su distancia de recorrido.

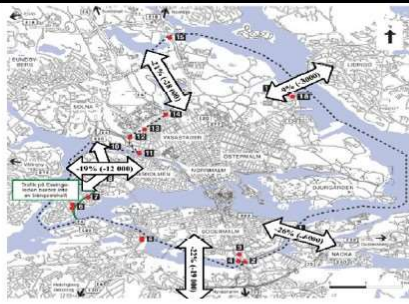
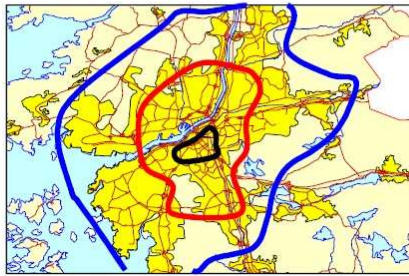
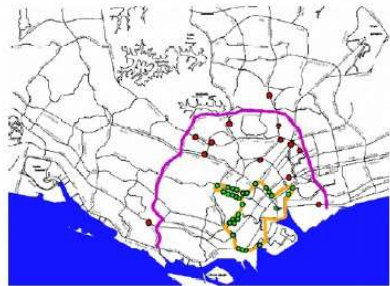

Algunos de los ejemplos más relevantes de tarificación viaria en el contexto internacional son resumidos a continuación, listando además las medidas complementarias que han sido implementadas para cada caso.

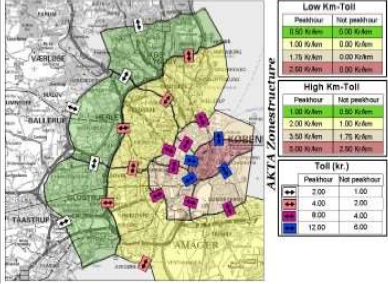



Cabe anotar que además de los ejemplos aquí citados, se ha tratado de implementar esquemas de tarificación viaria en entornos urbanos en ciudades como Manchester en el año 2008 y Edinburgo en el año 2005, los cuales fueron rechazados por los ciudadanos mediante referendo con cerca del 70% de la votación en contra de su implementación.





En el caso estadounidense, intentos infructuosos se han presentado en ciudades como San Francisco en el año 2006 y New York en el año 2007 entre otros, en los cuales las propuestas no han pasado el proceso de aprobación por parte de los gobiernos locales y federales.

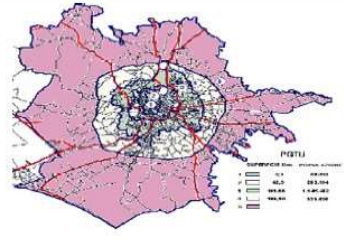
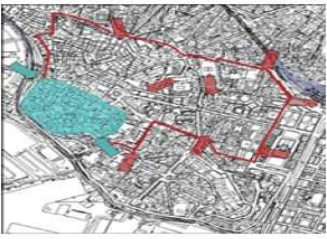


Tabla 2. Experiencias internacionales con estudios y aplicaciones de road pricing

Ciudad y características del <i>urban road pricing</i>	Topología tarifaria
<p><b>Estocolmo (Suecia)</b></p> <p>Zona del centro de la ciudad cargada con peaje. Tarifa variable en hora punta entre 10-20SEK, (9,17 SEK ≈ 1 €), Otras horas del día, fines de semana y festivos, no se cobra.</p> <p>Máximo 60 SEK por vehículo/día. Vehículos especiales no pagan.</p> <p>Financiación del ensayo entre el Gobierno y la ciudad de Estocolmo.</p> <p>Prueba puesta en práctica desde enero de 2006 y en septiembre se decidió que continuaba mediante votaciones.</p> <p>Los resultados mostraron la disuasión del tráfico en un 22% que representa 100.000 coches que no entraron al centro de la ciudad durante el periodo de tarificación (24h).</p> <p>Se favorece el transporte público como medida complementaria.</p>	 <p style="text-align: center;">Cordón con 18 puntos de control</p>
<p><b>Gotemburgo (Suecia)</b></p> <p>- Se plantean dos escenarios para el cobro de tarifas</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tasa kilométrica por Congestión: activo durante horas punta</li> <li>2. Tasa por efectos medio ambientales con tres anillos concéntricos</li> </ol> <p>-Ingresos destinados al sistema de tráfico.</p> <p>Activo durante las 24 horas del día</p> <p>Precio aumenta a medida que se acerca al centro de la ciudad</p> <p>Tarifas bajas aplicadas a todas las vías dentro de los cordones.</p>	 <p style="text-align: center;">Tres cordones concéntricos</p>
<p><b>Singapur</b></p> <p>1975 inicia primera vez en el mundo de <i>Area Licensing Scheme (ALS)</i>.</p> <p>Además de un paquete de medidas se instauró una tarifa por congestión.</p> <p>Restricción de vehículos al CBD (área 5,6 km<sup>2</sup>), con acceso por un número de puntos distintos.</p> <p>Inicialmente pago manual. En 1998 automático con instalación de OBU en los coches.</p> <p>Autos particulares SGD\$ 3/día, o SGD\$ 0.60/día por pago mensual.</p> <p>Vehículos comerciales pago doble. Taxis y vehículos con alta ocupación (&gt; 4 pasajeros) libres de pago. Pago con <i>Smart Card</i> en bancos, estaciones de combustible, puntos de venta.</p>	 <p style="text-align: center;">Topología tarifaria basada en un área</p>
<p><b>Hong Kong</b></p> <p>Peaje urbano con ERP (<i>Electronic Road Pricing</i>) Mejora de la infraestructura Privatización de estacionamientos en la ciudad.</p> <p>Introducción de <i>Park &amp; Ride</i> Altos costos en la propiedad de vehículos.</p> <p>Información en tiempo real para viajeros con GPS.</p>	

Ciudad y características del <i>urban road pricing</i>	Topología tarifaria
<p><b>Copenhague (Dinamarca)</b></p> <p>Variación de fases semafóricas para trasladar congestión a las autopistas y carreteras.</p> <p>Regular flujos (planes de movilidad, restricción de parking, altas inversiones en transporte público, (TP) y <i>road pricing</i> (RP)).</p> <p>1997: Plan de Tráfico y Medioambiente: regular demanda creciente de desplazamientos.</p> <p>1999: aceptada propuesta de esquema RP.</p> <p>2001-2003: Se ensaya con 500 veh. usando tecnología GPS.</p>	 <p>Topología tarifaria basada en cordones y tarifa kilométrica</p>
<p><b>Bergen (Noruega)</b></p> <p>Cobro a visitantes por aparcar en el centro ciudad.</p> <p>Se paga por entrar a la ciudad 15NOK por vehículo ligero y 30NOK por vehículo pesado de lunes a viernes de 6:00 a.m. - 10:00 p.m.</p>	 <p>Vías de acceso al centro de la ciudad cargadas con peaje en 7 puntos de cobro</p>
<p><b>Oslo (Noruega)</b></p> <p>1990: inicio de peaje urbano en las vías de acceso a la ciudad. 81% público en contra de la implantación.</p> <p>1992: personas en contra del peaje se redujo al 59%.</p> <p>Se paga por entrar a la ciudad 13NOK por vehículo ligero y 26 NOK por vehículo pesado. Sistema de cobro por anticipado que garantiza anonimato del usuario.</p> <p>Actualmente los usuarios usan AutoPASS-TAG.</p>	 <p>Anillo de peaje con 19 puntos de cobro</p>
<p><b>Trondheim (Noruega)</b></p> <p>Tarifa variable siendo mayor en hora punta, fines de semana y festivos, no se paga. Tarifa por ingresar al área central 15 NOK, de lunes a viernes de 6a.m. a 6p.m.</p> <p>Ingresos para transporte público, infraestructuras, seguridad vial y ambiental</p> <p>Disminución de congestión y mejorar accesibilidad</p>	 <p>Cordón de peaje: 22 puntos de cobro</p>

Ciudad y características del <i>urban road pricing</i>	Topología tarifaria
<p><b>Helsinki (Finlandia)</b></p> <p>Congestión en HP de mañana y tarde.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transporte público sensible a la congestión y clima.</li> <li>- Inadecuada infraestructura de carreteras.</li> </ul> <p>Peaje metropolitano tipo con diversos esquemas tarifarios, cordón en la parte urbana, con varios anillos y división por zonas.</p> <p>Integrar el sistema de peajes a la tarifa Integrada del TP, para favorecer desplazamientos multimodales.</p>	 <p>Sistema tarifario metropolitano zonal y kilométrico</p>
<p><b>Edimburgo (Escocia)</b></p> <p>Problemas de congestión, aparcamiento y contaminación del aire. Las carreteras siguen una estructura radial hacia el centro de la ciudad.</p> <p>Implementar <i>road pricing</i> con y un paquete de medidas.</p> <p>Implantar tres líneas de tranvías</p> <p>Funcionamiento de <i>Park &amp; Ride</i> - Mejorar servicio de autobuses e información en tiempo real a los viajeros, etc.</p>	 <p>Doble cordón</p>
<p><b>Bristol (UK)</b></p> <p>Cordón simple con sistema TAG (aparato electrónico que permite el flujo libre)</p> <p><i>Road pricing</i> como parte de medidas para mejorar movilidad en la ciudad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+Tren ligero, +Controlar tráfico y zonas de parqueo, +Crear Park &amp; Ride,</li> <li>+Nuevas líneas de autobuses, +Facilidades a ciclistas, +Información en tiempo real de los pasajeros</li> </ul>	 <p>Topología tipo cordón</p>
<p><b>Londres (UK)</b></p> <p>Después de varios estudios, en febrero de 2003 se implanta una tarifa de £5 por congestión en un área que cubre el corazón de Londres (22 km<sup>2</sup>), el cual esta limitado por una carretera que forma un anillo interior. Sólo se cobra a las personas que cruzan el anillo, no para los que están en el anillo. Se incrementa la tarifa actual a £8 (julio -2005)</p> <p>Aprovecha la experiencia e implementa la actual tecnología para tarifar la zona a ampliar.</p> <p>La tarifa se aplica de lunes a viernes desde las 7:00 a.m hasta las 6:30 p.m y no aplica los días festivos. Se puede pagar por correo, teléfono, SMS o Internet. Base de datos registra la placa del vehículo que hizo el pago.</p> <p>Existen dos rutas libres de tarifa para evitar el efecto barrera.</p>	<p>Topología tipo cordón</p>  <p>Zona a ampliar</p>

Ciudad y características del <i>urban road pricing</i>	Topología tarifaria
<p><b>Roma (Italia)</b></p> <p>Zona de acceso restringido área central histórica 4,6 Km<sup>2</sup>. 23 entradas Centro de control complejo. Días laborables 6:30 – 18:00, Sábados 14:00 – 18:00 Tecnología TELEPASS: Cámaras de video con infrarrojos. Transmisión de datos por micro-ondas, Sistema OBE (<i>On Board Equipment</i>) con <i>Smart Card</i></p>	
<p><b>Génova (Italia)</b></p> <p>Alta congestión y contaminación Uso deficiente del TP Problemas de parking. Inadecuada red de infraestructuras <i>Cordon pricing</i>, área de 2,5 Km<sup>2</sup>. Aplicación de tecnología de punta. Los vehículos no necesitan implementar ningún dispositivo</p>	 <p>Topología tipo cordón</p>

Fuente: Salas, M. (2008)

### 2.3.2 Beneficios y desventajas de su implementación

Por una parte, entre los beneficios de implementar este tipo de medias se pueden destacar los siguientes:

- La tarificación viaria es un buen instrumento para la internalización de muchas de las externalidades producidas por el sector transporte y en particular en entornos urbanos por el vehículo privado. Esto es especialmente cierto en estrategias orientadas a la reducción de los costes por congestión (Goodwin, 1997) dado que esta medida apunta hacia un menor uso del vehículo privado. El simple hecho de mover el tráfico hacia otras rutas ofrece pocos beneficios, dado que causa una dispersión de los impactos al incrementar el tráfico en otras vías, las cuales, si ya se encuentran con cierto nivel de congestión, pueden verse incrementados los costes por accidentalidad como lo plantean Shefer y Rietvald (1997), no obstante, si las vías alternativas estaban siendo subutilizadas, una redistribución del tráfico en la red resulta beneficiosa.
- La tarificación viaria que reduce el total de vehículos que viajan pueden reducir los costes de provisión de vías y aparcamientos, incrementa la seguridad viaria, y aporta a la protección del medio ambiente. El esquema de tarifa por congestión implementado en el centro de Londres dio como

resultado un 12% de reducción en el total de vehículos-kilómetro, y de un 30% en el tráfico de automóviles, con una reducción de un 28% en los accidentes de tráfico, mientras las motos y ciclomotores incrementaron sus viajes en un 10-15%, la reducción de sus accidentes cayó un 4%, al igual que disminuyeron en un 6% los accidentes en los que se ven involucrados peatones (Richards, 2006).

- Cabe anotar que a diferencia de la tarificación viaria destinada a regular la congestión, la destinada a recaudar fondos para el aumento de la capacidad viaria puede incrementar los viajes en automóvil, incrementando así en el mediano plazo la congestión de tráfico, los costes asociados a la provisión de aparcamientos, la accidentalidad, la contaminación y la dispersión urbana. De esta manera el aumento de la capacidad viaria y por consiguiente de los volúmenes de tráfico, tiende a reducir la habitabilidad de las comunidades que se ven implicadas (Levine y Garb, 2000).

Por otra parte, entre las desventajas de implementar este tipo de medidas se pueden destacar las siguientes:

- El coste de implementar un sistema de peaje electrónico en entornos urbanos es muy alto. Los principales costes están relacionados con los costes de transacción para identificar y cobrar las tasas, dichos costes de cobro de las tasas están en el rango del 10% del total del recaudo para un sistema electrónico. (En el caso de carreteras con sistemas manuales dicho coste es superior y repercute además de manera directa en los usuarios en demoras e incremento de consumo de energía y emisión de contaminantes).
- Presentan una baja aceptación por parte de los ciudadanos y ello redundo en una baja disposición de los políticos locales encargados de la toma de decisiones para implementarlos
- En términos de externalidades ambientales negativas, la tarificación viaria (con la excepción del ruido) aunque puede realizar importantes aportaciones no es probablemente el instrumento más óptimo para su internalización. Tasas sobre combustibles y sobre las emisiones cargan las emisiones de vehículos de una manera más directa.
- Si la tarificación viaria tiene fines recaudatorios para la financiación de infraestructuras viarias (ampliación o nueva dotación) la medida tiene efectos reversibles en los que después de un tiempo los niveles de congestión son recuperados, pero con mayor impacto, por lo cual, es necesario que el recaudo en cualquier caso esté orientado a fomentar el desarrollo de los sistemas de transporte de mayor eficiencia ambiental como el transporte público y los modos no mecanizados.

## 2.4 Redistribución del uso del espacio viario

La redistribución del uso del espacio viario (en inglés, *Road Space Re-allocation*) es una estrategia de gestión de la movilidad orientada a hacer un uso más eficiente del espacio viario -entendido como un bien público escaso- por parte de los diversos modos de transporte. Ello implica dar prioridad en el uso de dicho recurso a los modos de transporte de mayor eficiencia como el transporte público y los modos no motorizados (caminar y bicicleta).

Esta medida puede ser especialmente apropiada cuando se aplica sobre corredores congestionados. Los requerimientos de espacio viario urbano por parte de los vehículos se incrementan en función del tamaño y la velocidad de dichos vehículos, así el vehículo privado requiere mucho más espacio viario por pasajero transportado que otros modos de transporte (Litman, 2001), con lo cual los usuarios del vehículo privado aportan al sistema una mayor congestión que otros modos de transporte. Así, desde el punto de vista de la eficiencia y de la equidad, la redistribución del uso de espacio viario hacia los modos de transporte más sostenibles (transporte público, bicicleta, peatón) es un objetivo a conseguir.

El espacio viario que usualmente ha sido dedicado al vehículo privado y que va a ser transferido a otros modos de transporte más sostenibles, puede ser utilizado de múltiples maneras: implantación de carriles bus, carriles de alta ocupación, carriles multifunción, ampliación de aceras, implantación de carriles bici o itinerarios peatonales, etc. El uso que se haga del espacio viario liberado del vehículo privado es determinado en función de las necesidades y vocación de la zona de la ciudad en que se esté implementado la medida.

De esta manera, la redistribución del uso del espacio viario para materializarse puede hacer uso de otros múltiples instrumentos de gestión de la movilidad (VTPI, 2018) entre los que se encuentran:

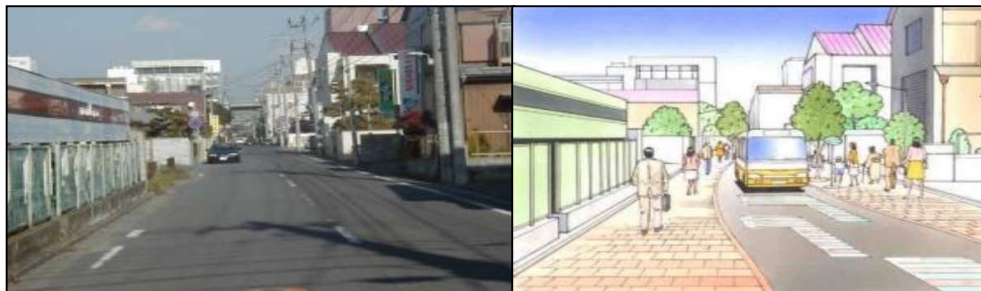
- Gestión de accesos restringidos a zonas específicas de la ciudad
- Planificación de zonas libres de automóviles
- Mejoras a las facilidades para ciclistas
- Carriles exclusivos para vehículos de carga
- Carriles de alta ocupación
- Carriles exclusivos para bus y sistemas Bus Rapid Transit
- Gestión del aparcamiento
- Diseño viario universal (coexistencia de diversos tipos de tráfico)
- Planes de pacificación del tráfico en zonas residenciales y comerciales

Figura 3. Reasignación en una vía arteria, reduciendo número de carriles para ampliar aceras



Fuente: Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Advanced Road Design and Safety Division  
[www.nilim.go.jp](http://www.nilim.go.jp)

Figura 4. Reasignación en vía local, reduciendo la calzada para crear aceras



Fuente: Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Advanced Road Design and Safety Division.  
[www.nilim.go.jp](http://www.nilim.go.jp)

Durante mediados de los años 1990s se presentó un cambio radical en la política gubernamental del Reino Unido con respecto a la construcción de vías, que apuntaba en el sentido de que la construcción de vías no era siempre una solución a la congestión, en tanto que la creación de una mayor capacidad viaria podía generar un mayor tráfico.

Este cambio se debió, en parte, a la supervisión técnica del *Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment SACTRA (DETR, 1994)* y, en parte, al reconocimiento popular de que, por ejemplo, la construcción de la autopista M25 en los alrededores de Londres no había producido una consistente condición de flujo libre a pesar de que esta había sido construida con una excesiva capacidad adicional respecto a las condiciones de tráfico anteriores a su construcción.

Para entonces, si bien fue oficialmente reconocido que la construcción de vías podría inducir un tráfico adicional, la formulación opuesta que planteaba que la reducción de espacio viario podría reducir el tráfico, no fue ampliamente aceptada, ni a nivel teórico ni a nivel práctico, con lo cual múltiples propuestas para implementar esquemas que dieran prioridad al bus y los peatonales fueron rechazadas por el temor a las posibles consecuencias negativas de circulación.

En busca de respuestas a tales planteamientos, en 1998 el *London Transport* y el *Department of Environment, Transport and the Regions –DETR-* encargaron una investigación al respecto. Una parte de la investigación fue desarrollada por un equipo de investigadores del *University College London*, referente al análisis de las evidencias empíricas (Cairns, Hass-Klau, y Goodwin, 1998), y otra parte por la firma consultora MVA, referente al estudio de las implicaciones en modelización (MVA, 1998).

En estas investigaciones fueron examinados más de 60 casos en los cuales una porción de espacio viario destinada al vehículo fue transferida a otros usos. Los casos estudiados fueron en once países: Reino Unido, Alemania, Suiza, Italia, Países Bajos, Suecia, Noruega, Estados Unidos, Canadá, Tasmania y Japón.

A pesar de que en unos casos la transferencia de espacio viario fue hecha de manera deliberada para favorecer al transporte público (carril bus) y zonas peatonales, mientras en otros casos correspondían a situaciones fortuitas en las que la restricción del uso de una determinada vía se debía por ejemplo a trabajos de construcción; para todos los casos se había previsto que generarían un mayor caos de tráfico.

El análisis de las evidencias sugirió que dichas predicciones muy rara vez fueron adecuadas. No se reportó que se produjeran paralizaciones prolongadas del tráfico en el largo plazo, aunque sí se reportaron trastornos del tráfico en el corto plazo, y algún incremento de problemas de tráfico en algunas vías locales. En muchos casos hubo significativas reducciones en la cantidad total de tráfico en las redes estudiadas.

En promedio en todos los casos estudiados, un 14% del tráfico que habitualmente hacía uso de la ruta intervenida, desapareció de la red de la zona afectada. Sin embargo, los resultados variaron sustancialmente dependiendo del contexto. Por ejemplo, en aquellos casos en los que el esquema implementado hizo más atractivo el transporte público, hubo más disposición entre los conductores de vehículo privado a cambiar de modo de transporte en dicho viaje.

El estudio plantea un modelo de comportamiento de los conductores, el cual explica lo que sucede con aquellos vehículos que desaparecen de la red local. Este establece que inicialmente cuando el espacio viario al vehículo privado es reducido los conductores optan por cambiar su estilo de conducción de manera que quepan más vehículos en la vía, como, por ejemplo, conduciendo más cerca unos de otros. En tanto que la situación se va deteriorando, los conductores asumen como segunda opción cambiarse a calles de los alrededores o cambiar la hora de su viaje con tal de evitar el periodo del día que presenta peor tráfico. En tanto que tales ajustes también presentan dificultades una amplia variedad de respuestas es desencadenada, las cuales incluyen modificación en cómo se viaja, dónde llevar a cabo sus actividades, cambio de lugar de vivienda o trabajo, en las cuales las condiciones de viaje inclinan la balanza en la toma de decisiones que usualmente no jugarían un papel fundamental. Este último grupo



de opciones son las que aportan una explicación la desaparición de un porcentaje de los vehículos en el área de incidencia de implementación de la medida.

Los resultados realzan la variabilidad que subyace en el aparente estable flujo de tráfico, y destaca los elementos que pueden favorecer en un cambio en los hábitos de viaje de los usuarios del vehículo privado.

Esto implica que en ciertas situaciones no solo es impreciso asumir que la demanda de viajes en vehículo privado continuará constante después de implementada la medida, sino que, ante una implementación acertada, se puede presentar una reducción de la misma.

De ello se desprenden tres interesantes conclusiones resumidas como sigue:

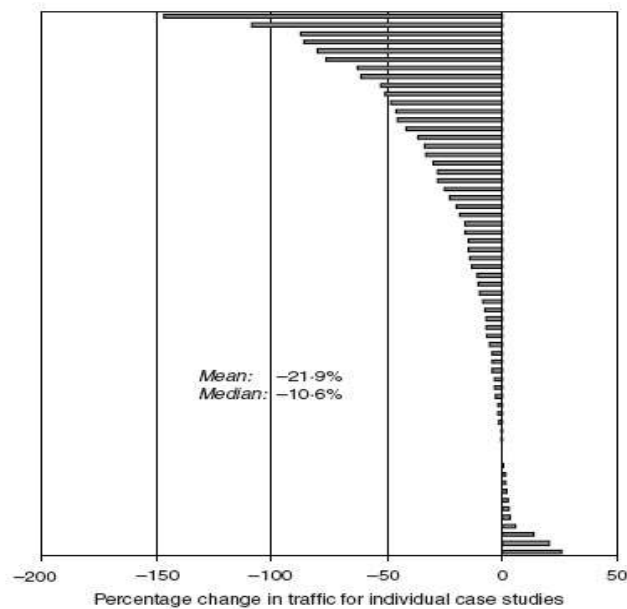
- a) Ante una redistribución de espacio viario los efectos en congestión son mucho menores que los estimados en las predicciones de tráfico
- b) Los niveles medios de tráfico en la zona de implementación y sus alrededores pueden tener importantes reducciones
- c) La reducción se debe en parte a que la toma de decisiones por parte de los conductores ante un cambio de las condiciones en la oferta viaria es mucho más compleja que los supuestos que manejan los programas de simulación de tráfico.

Estudios posteriores ([Cairns et al, 2004](#)) han aportado evidencias empíricas de cómo ante implementaciones de carriles bus en el espacio viario antes destinado al vehículo privado la demanda de este último se ve reducida. El caso de la ciudad de Bristol (Reino Unido) en el cual fue introducido un corredor exclusivo de bus, y al evaluar seis meses después los resultados de la medida se identificó un incremento del uso del bus por parte de aquellos que anteriormente eran usuarios del vehículo privado.

En otro estudio ([Cairns, Atkins and Goodwin, 2002](#)), como muestra la Figura 5, la media (promedio) fue una reducción del tráfico de 21,9% y la mediana—la cual es una mejor medida de la tendencia central aquí dada la variabilidad de los resultados— fue de 10,6%. Esto quiere decir que en la mitad de los casos cerca del 11% de los vehículos que previamente utilizaban la vía o el área donde se aplicó la reasignación viaria desaparecieron de la zona. Nótese que dichos valores varían para cada tipo de actuación (regulación de un centro urbano o implantación de un carril bus), con lo cual resulta importante desarrollar estudios empíricos específicos para cada tipo de casos.

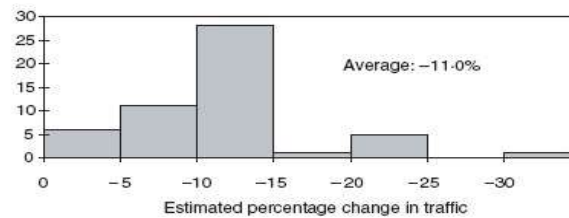
Estos resultados muestran que ante una adecuada implementación de la medida se pueden presentar importantes reducciones de tráfico, pero esta dependerá de la naturaleza y las condiciones en que se lleva a cabo. Otros elementos claves están relacionados con una efectiva socialización de la iniciativa entre los ciudadanos para que sean conscientes del nuevo escenario.

Figura 5. Distribución de cambios en el nivel de tráfico generados por redistribución de espacio viario para los diversos casos de estudio

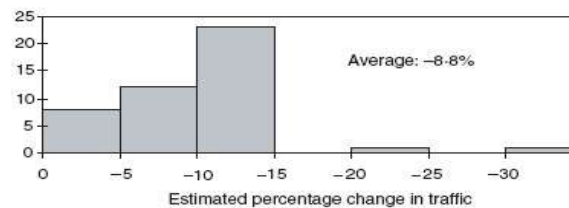


Fuente: Cairns, Atkins and Goodwin (2002)

Figura 6. Estimación de reducción en el nivel de tráfico generado por (a) re-asignación de espacio viario de naturaleza general (a) y (b) para el caso de implantación de carril bus (b).



(a)



(b)

Nota: Resultados basados en encuestas a profesionales implicados en la implementación de los diversos casos.

Fuente: Cairns, Atkins and Goodwin (2002)

Tabla 3. Cambios en nivel de tráfico generados por iniciativas de reasignación de espacio viario

Description	Vehicle flows on altered route/area		Vehicle flows on parallel/alternative routes		Traffic change (E)	
	Before (A)	After (B)	Before (C)	After (D)		
Nurnberg Rathausplatz 1988–1993 (5 years)	24584	0	67 284	55 824	-146.6	*
Wiesbaden city centre and boundary 1990–1992	1303	366	8445	7968	-108.5	*
Southampton city centre 1996–2000	5316	3081	26 522	24 104	-87.5	*
Nurnberg Rathausplatz 1988–1989 (1 year)	24584	0	67 284	70 692	-86.1	*
Tower Bridge closure 1993 (1 month)	44 242	0	103 262	111 999	-80.3	
Partingdale Lane local area 1997 (6 months)	988	18	2519	2735	-76.3	
Rotherhithe Tunnel closure 1998 (1 month)	40 000	0	245 381	260 299	-62.7	
Hobart: Tasman Bridge collapse (14 months)	43 930	0			-61.3	
Orpington High Street closure 1996 (3 months)	1105	760	7084	6847	-52.7	*
Bologna city centre 1981–1989	177 000	87 000			-50.8	*
Harshin-Awaji earthquake 1995 (after highways restored)	252 900	103 300	205 900	233 600	-48.2	
Gothenburg CBD 1970–1980	150 000	81 000			-46.0	*
New York highway closure 1973 (2 years)	110 000	50 000	540 000	560 000	-45.5	
Edmonton–Kinnaird Bridge closure 1979 (3 weeks)	1300	0	2130	2885	-41.9	
New York highway closure 1973 (1 year)	110 000	50 000	540 000	560 000	-36.4	
Hammersmith Bridge 1997—local area only (1 month)	30 698	3000	104 698	122 106	-33.5	
A13 closure, 8 June 1996 (same day)	56 000	22 800	50 800	65 513	-33.0	
Partingdale Lane local area 1997 (3 months)	988	21	2519	3190	-30.0	
A13 closure, 1 June 1996 (same day)	56 000	19 722	50 800	71 463	-27.9	
Oxford Street 1972—1st phase	1800	950	4050	4400	-27.8	*
Ring of Steel 'central core' 1992–1994	160 000	120 000			-25.0	*
A13 closure, 15 June 1996 (same day)	54 200	26 804	52 200	67 347	-22.6	
Aarau 1988–1994 (evening peak traffic)	1444	1132	2275	2301	-19.8	
Oxford Transport Strategy 1999 (12 months)	57 186	46 773			-18.2	*
Hamm 1991	21 500	18 000			-16.3	*
York: Lendal Bridge closure 1978–1979 (1 month)	16 290	0	49 100	62 800	-15.9	
Lüneburg 1991–1994	106 002	90 597			-14.5	*
Wolverhampton 1990–1996 (within ring road)	81 500	69 750			-14.4	*
Hobart 1975: Tasman Bridge restored 5 months	43 930				-14.0	
Bologna city centre 1972–1974	213 200	185 500			-13.0	*
Leeds HOV 1998 (1 month)	3384	2779	10 824	11 069	-10.6	*
Cambridge—Bridge Street closure 1997 (5 months)	23 411	20 931			-10.6	*
Oxford bus lanes 1974–1975 (1 year)	60 684	54 820			-9.7	#
Cambridge Core Traffic Scheme 1996–2000 (4 years)	76 155	69 792			-8.4	*
Loma Prieta earthquake 1989 (after restoration)	245 000				-7.5	
A104 Bridge Road bus lane 1994 (1 year)	34 070	31 102	81 609	82 121	-7.2	#
Freiburg ring road 1996–1997 (10 months)	34 200	22 600	64 500	73 700	-7.0	*
Oxford city centre 1974–1984 (10 years)	60 684	56 599			-6.7	
York bus lane (7 weeks—50% signal capacity)	681	650	600	594	-5.4	#
York bus lane (1 week—67% signal capacity)	681	645	600	606	-4.4	#
Cardiff bus lanes 1993–1996	156 299	149 596			-4.3	#
Gothenburg central urban area 1975–1980	320 000	307 200			-4.0	*
Leicester ring road—am peak 1999 (2 months)	4575	3972	6059	6511	-3.3	*
Edinburgh—Princes Street closure 1997 (3 months)	221 953	215 011			-3.1	*
M4 bus lane 1999 (1 year)	52 800	51 300			-2.8	#
Northridge earthquake 1994 (after restoration)	698 000	670 000			-1.7	
Nottingham traffic collar 1975–1976 (9 months)	13 380	13 150			-1.7	
Wolverhampton 1990–1996	222 900	220 300			-1.2	*
Cambridge—Emmanuel road closure 1999 (7 months)	70 030	69 792			-0.3	*
Ring of Steel 'Square Mile' 1992–1994 (1 year)	254 192	253 613			-0.2	*
Edinburgh—Princes Street closure 1997 (1 year)	221 953	221 834			-0.1	*
Munich bridge closure 1988	32 000	0	71 000	103 000	0.0	
Vauxhall Cross area 1999 (3 months)	537 543	539 704			0.4	
Orpington High Street closure 1996 (1 year)	1105	744	7084	7461	1.4	*
Frankfurt am Main bridge closure 1989	29 500	0	162 500	192 500	1.7	
Westminster Bridge 1994–1995	41 739	41 284	90 276	91 626	2.1	
M4 bus lane 1999 (2 months)	52 800	54 000			2.3	#
Cambridge—Bridge Street closure 1997 (2 months)	31 869	28 781	44 286	48 338	3.0	*
Norway—Street enhancement 1991–1995	15 300	15 800			3.3	*
Leicester ring road—am peak period 1999 (2 months)	109 35	11 212	7542	7918	6.0	
Aarau 1988–1994 (24 h traffic)	18 292	17 244	26 512	30 093	13.8	
Six Towns Bypass Project (1992–1995)	38 212	30 968	51 697	66 808	20.6	
Leeds HOV 1998 (13 months)	3384	3438	10 824	11 634	25.5	

Where the third and fourth columns are shaded, traffic has usually been counted crossing a cordon around an area-wide scheme (typically a town centre), such that there are no 'alternative routes' into the affected area.  
Dates refer to scheme dates. Monitoring period after scheme opening is given in brackets. \* = town centre scheme; # = bus lane.

Table 1. Recorded changes in traffic levels for individual case studies

Fuente: Cairns, Atkins and Goodwin (2002)

### **2.4.1 Algunas experiencias internacionales**

La redistribución del uso de espacio viario generalmente es entendida como un instrumento que busca una reducción del tráfico motorizado y con ello una reducción indirecta de sus externalidades negativas asociadas.

A pesar de que dicha idea generalizada, múltiples implementaciones alrededor del mundo se han desarrollado a partir de fijar objetivos mucho más ambiciosos y diversos que, aunque contienen en sí mismo los anteriormente citados, se han enfocado directamente en la mejora integral del entorno en el cual se localizan las múltiples actividades urbanas (residencia, trabajo, ocio, etc.).

Así, para el caso del Reino Unido se pueden citar algunas iniciativas que han sido ampliamente analizadas en diversos reportes técnicos ([Atkins y Cairns, 2002](#)). Este es el caso de la ciudad de Gloucester que buscaba la reducción de víctimas asociadas a accidentes de tráfico, los casos de las ciudades de Cambridge y Oxford que buscaban la mejora de la calidad del centro urbano, el caso del sur de la ciudad de Londres -Vauxhall Cross- que buscaba una regeneración comunitaria, el caso de la ciudad de Leicester que buscaba una mejora del entorno para potenciar la inversión empresarial, y el caso de la ciudad de Leeds con su carril de alta ocupación, entre otros.

En [Cairns, Atkins y Goodwin \(2002\)](#), el cual incorpora también resultados de estudios anteriores, se presenta una rigurosa revisión de algunos de los proyectos de reasignación de espacio viario más emblemáticos de la década de los 90's en el Reino Unido:

Algunas de las iniciativas consideradas exitosas:

- La Estrategia de Transporte de Oxford (Oxford, UK)
- La Estrategia de Transporte de Cambridge (Cambridge, UK)
- El carril-bus en la Autopista M4 (Gran Londres, UK. 1999)
- El caso del Vauxhall Cross (Londres, UK. 1999)
- El caso de la zona comercial de Wolverhampton (UK. 1987-1991)

Iniciativas consideradas fallidas:

- La introducción del carril bus en la ciudad de Dunstable (UK. 1999)
- El cierre de la Calle Orpington High (Gran Londres, UK. 1996).
- El cierre del Puente Hammersmith (Londres, UK. 1997)

En dicho estudio, además de sus resultados, son evaluados los factores clave que posibilitaron el éxito en este tipo de iniciativas, éxito que no solo radica en que las mejoras en movilidad son evidentes (reducción de la congestión y mayor fiabilidad), sino también, en que el desmesurado nivel de caos que se esperaba, por parte de algunos expertos, que se podría generar con la implementación de dicha medida, nunca apareció, o fue mucho menor de lo esperado.

Como se ha mencionado anteriormente, el principal hallazgo de dicho estudio es que las condiciones de tráfico posteriores a la implementación de la medida

(redistribución del uso del espacio viario), rara vez fueron tan malas como se esperaba. Comúnmente, los medios de comunicación locales se enfocaron en alertar a los ciudadanos sobre el inminente caos de tráfico que se generaría con la implementación de la medida.

Por ejemplo, en el caso del cierre del *Puente Hammersmith* (Londres) en 1997, se esperaba que generara una parálisis total en el sur-este de Londres, pero un par de años después, dichos resultados esperados seguían sin manifestarse de manera clara. En lugar de esto, la percepción entre técnicos y ciudadanos era que “una gran parte del tráfico parecía haber desaparecido de la zona, sin saberse claramente que había sucedido con este”.

En general, a partir del análisis de casos, se puede decir que a partir de la implementación de la medida, ha habido reportes de caos de tráfico de corta duración, en particular, en aquellas calles por fuera de los límites del área de regulación, que con anterioridad a la implementación de la medida ya presentaban serios problemas de congestión. No obstante, graves problemas de tráfico de larga duración han sido escasamente reportados.

Estos hallazgos parecen sólidos, en tanto que una revisión de las iniciativas desarrolladas hasta el año 2002, ha identificado solo dos casos en los cuales la medida ha sido retirada, estos son, por una parte, la introducción de un carril bus en la ciudad de Dunstable (UK) en 1999, y por otra, el cierre –de prueba- de la calle Orpington High (Orpington, UK) en 1996. Dunstable es una ciudad del centro de Inglaterra –a unas 30 millas al norte de Londres- con unos 33.000 habitantes (datos censo del 2001) y Orpington es pueblo suburbano con unos 15.000 habitantes (datos de 2007) que hace parte del Gran Londres y se localiza en el sur-este del mismo.

En el caso del cierre de la *Calle Orpington High (Orpington High Street)*, la iniciativa fue retirada porque hubo problemas con la ejecución, y, además, los pequeños y medianos comerciantes localizados en la zona no estaban convencidos de los beneficios. Sin embargo, medios alternativos de mejora de la accesibilidad para peatones y otros grupos prioritarios han sido explorados.

En el caso de la introducción del *carril bus en Dunstable*, algunos problemas con el calendario de los trabajos de ingeniería y una infortunada combinación de circunstancias cuando la línea de bus fue abierta, generaron problemas significativos que hicieron políticamente indeseable continuar con la iniciativa.

Cabe mencionar aquí también el caso del *cierre del Puente Hammersmith* al tráfico general, dado que aunque desde su cierre en 1997 esto no generó problemas de tráfico, dos años después, en 1999, fue reabierto. Pero se debe precisar que el puente no fue cerrado como parte de una política planeada por la ciudad, y, además, que su reapertura estuvo basada en la opinión pública en lugar de en una evaluación técnica de las condiciones de tráfico.

Estos ejemplos fallidos son contrastados por los más de 40 casos de esquemas planificados que han sido exitosamente implementados y que aún siguen en funcionamiento. La encuesta de opinión profesional confirma este planteamiento (Cairns, Atkins and Goodwin, 2002). Cerca del 90% de los encuestados conocían un esquema de redistribución del uso del espacio viario, el cual, aparentemente o definitivamente, había sido implementado sin causar problemas significativos para el tráfico general. Sin embargo, menos de un cuarto de los encuestados habían escuchado de un esquema que hubiera, aparentemente, dejado problemas de tráfico de largo término, y solo un 7% afirmó tener conocimiento o haber participado en iniciativas que sí tuvieron tales efectos negativos. (Cairns y Goodwin, 2002)

De ello, actuales experiencias sugieren que es raro que esquemas de redistribución del uso de espacio viario causen un sustancial e inaceptable nivel de congestión y atasco. Por supuesto, en el pasado, son solamente los esquemas mejor planeados los que habían sido aceptados e implementados, por lo cual, no se puede afirmar que toda propuesta para dar más espacio viario a buses, ciclistas o peatones, estará libre de problemas. No obstante, los interesantes resultados del estudio de casos, sugiere a los tomadores de decisiones que deberían asumir actitudes menos conservadoras en este sentido y potenciar la implementación de dichos esquemas.

Sin embargo, el generalizado éxito de la implementación del esquema no solo obedece a asuntos técnicos, sino también, como lo demuestran los casos del carril bus en la autopista M4 (Gran Londres, UK) y la Estrategia de Transporte de Oxford (Oxford, UK), la importancia de dar de manera correcta los detalles del esquema de implementación, y hacer una buena gestión de la opinión pública y los medios de comunicación.

Esto implica que, en lo que respecta al éxito de la implementación del esquema, la primera impresión es muy importante y puede ser determinante en la aceptabilidad del esquema en el largo término.

De este planteamiento se desprenden cuatro importantes implicaciones que se describen a continuación:

- a) Plantear un buen esquema desde el principio y asegurarse de que todos los detalles son implementados correctamente:

En la comprensión de este importante aspecto, la experiencia de la ciudad de Dunstable, si bien es fallida, resulta beneficiosa (ESD-BCC, 1999; 2000; 2001). En septiembre de 1999, un carril bus fue abierto en una vía de acceso que dirige al mayor cruce de la ciudad. El carril bus fue cerrado después de diez semanas, debido a la protesta generalizada como producto de las condiciones de tráfico. Sin embargo, un monitoreo sugirió que una disposición diferente de las señales de tráfico en los cruces, la iniciativa del carril bus habría significado beneficios al tráfico. Hubo varias razones por las cuales la apertura del carril bus fue

particularmente infortunada. Los trabajos de construcción sufrieron retrasos, con lo cual, el carril bus se abrió a finales de las vacaciones de verano. Esto significó que se inaugurara de manera coincidente con la época en la que los niños vuelven al colegio (época en la que los niveles de alto son inusualmente altos), además se coincidió con trabajos de obra en la vía A5 (la cual es otra de las principales vías que dirige el tráfico al mayor cruce de la ciudad) y cambios en la autopista M1, lo cual causó una significativa desviación del tráfico del perímetro urbano de Londres a través de Dunstable. Además, el diseño operativo de los semáforos resultó inadecuado, el cual fue replanteado rápidamente, no obstante, ya habían tenido eco en los medios de comunicación. Todos estos aspectos habrían sido evitables si se hubiera presionado a los contratistas a terminar las obras a tiempo y se hubieran asegurado de que el sistema de semaforización diseñado tendría un buen desempeño desde el primer momento.

- b) Monitorear todos los aspectos que generan controversia, de manera que las críticas puedan ser enfrentadas con hechos y asegurarse que los hechos estén rápidamente disponibles:

Los casos del cierre del Puente Hammersmith (Londres, UK), la Estrategia de Transporte de Oxford (Oxford, UK) y el carril bus de la Autopista M4 (Gran Londres, UK), son ejemplos que demuestran la importancia de monitorear, y, en particular, de tener datos correctos a mano para responder rápidamente a las críticas.

En el caso del cierre del Puente Hammersmith, no se hizo un registro – estudio- de congestión de tráfico de la situación anterior a la implantación de la medida, en ninguna de las vías cercanas. A pesar de que se llevaron a cabo diversos análisis de otros tipos (y conteos en el puente al igual que encuestas a usuarios del puente que sugerían que se había presentado una reducción del uso del vehículo privado en el conjunto de la zona) la congestión resultó ser el tema crucial, y no hubo un exhaustivo monitoreo de las demoras para destacar si, en efecto, el cerramiento del puente al tráfico general había significado un empeoramiento del tráfico en la zona, o si, más bien, el nivel de tráfico fue ampliamente sintomático del fuerte tráfico que caracteriza generalmente a Londres.

En la Estrategia de Transporte de Oxford (OCC, 2001) un aspecto crítico ha sido el impacto en el comercio de la zona. Aunque el movimiento de peatones en el centro se ha incrementado, y hay una lista de espera de tiendas que quieren ocupar locales comerciales en la zona, la evidencia respecto a los efectos financieros para los comercios existentes al momento de implementar la iniciativa, siguen siendo mixtos. Esto se debe, parcialmente, a que ha sido muy difícil persuadir a una muestra representativa de los comerciantes a participar en el desarrollo de

encuestas, y parcialmente, a que no existía un parámetro de referencia de esta actividad a nivel nacional.

En el caso del carril bus en la Autopista M4 (Mellors, 2000), el cual fue implementado en 1999, un monitoreo de los datos ha mostrado mejoras en el tiempo de viaje en hora pico para 300 o más taxis, buses y autobuses, que usan el carril bus por hora, y para el tráfico general que ahora permanece en dos carriles entre las salidas 2 y 3 (diferente al sistema previo en el que este transcurría en 3 carriles para posteriormente sufrir un gran embotellamiento en el punto en que se reducía a 2 carriles en su tramo elevado). En efecto, el nuevo esquema fue reportado de manera favorable en todos los periódicos el 8 de noviembre de 1999, cuando la Agencia de Carreteras dio a conocer los resultados del monitoreo de los primeros tres meses. Sin embargo, la percepción pública aún está influenciada por los reportes de desastre de la época cercana a la inauguración del carril bus, en la cual hubo pocos hechos disponibles, como para que los medios de comunicación crearan su propia interpretación de los hechos. Además, esta interpretación es, a menudo, reciclada en reportes subsecuentes. Dicha situación, da clara cuenta de la necesidad de que las autoridades locales encargadas de la implementación del esquema, comunicaran a la opinión pública los primeros reportes en el menor tiempo posible, explicando las condiciones en las que el nuevo esquema estaba operando.

- c) Usar la prensa y los trabajos de consulta pública para enfatizar en que es posible que haya problemas iniciales:

En este sentido, la experiencia del caso de Vauxhall Cross (una zona urbana del sur de Londres) resulta interesante (Faber, 1999). La primera fase del esquema fue introducida en junio de 1999, y había implicado remover el 10% de la capacidad del mayor sistema giratorio en el sur de Londres, el cual soportaba unos 10.000 vehículos por hora en periodos punta. Hubo una considerable sensibilidad frente al plan por parte los municipios cercanos a Londres y la Dirección de Tráfico de Londres, dado que el esquema de prueba tenía que ser capaz de revertirse en 3 horas. El periódico local "The Evening Standard" publicó encabezados prediciendo un día catastrófico para los conductores en Londres (Williams, 1999), pero los resultados de la implementación, aun años después, se calificaban como relativamente libres de problemas. En parte, el éxito del esquema radicó en la alta calidad del diseño del mismo, pero también, en parte, fue debido a la campaña de información a los conductores que, durante las semanas previas, alertaba sobre la posibilidad de que se pudieran presentar complicaciones.

- d) Implementar por etapas los esquemas controversiales, tratar de influencias cualquier potencial efecto secundario para que sea positivo



en lugar de negativo, y asegurar que los beneficios en cada etapa sean obvios:

Un número de estos intentos de cambiar las condiciones de tráfico a través de una amplia área, destacan el hecho de que estos han implementado por etapas controvertidos esquemas, donde cada etapa puede ser removida si es necesario, y además, destacan el hecho de que este enfoque puede ayudar a ganar aceptación política y pública.

En el caso del esquema del Vauxhall Cross, la reversibilidad de su primera fase, le ayudó a ganar aceptación para su posterior introducción.

El caso de Wolverhampton (ciudad de unos 230.000 habitantes, localizada en el noroeste de Inglaterra) es otro ejemplo de esquemas implementados exitosamente por su enfoque por etapas que, en su caso, fue desarrollado entre 1987 y 1991 (Read, 1992). Previo a su implementación, las preocupaciones sobre sus posibles efectos negativos en el comercio local, eran uno de los aspectos más importantes. Resulta destacable que la municipalidad actuara en cooperación con los comerciantes del sector, pagando anuncios de radio sobre la disponibilidad de park-and-ride y distribuyendo información sobre el acceso general para compradores. Wolverhampton fue posteriormente premiado con el *Town Centre Environment Award* por el Concejo Británico de Centros Comerciales en 1993.

El caso de la Estrategia de Transporte de Cambridge (Cambridge, UK), es también un buen ejemplo de esquema implementado por etapas, donde el tráfico de paso es gradualmente excluido del centro de la ciudad mediante un secuencial cierre de las tres rutas de paso (WS ATKINS, 2000). La primera, la calle Bridge (Bridge Street) fue cerrada en enero de 1997. Desde entonces esta ha sido rediseñada, lo cual ha resultado popular, lo cual mejoró la aceptación para cuando la segunda vía de paso iba a ser cerrada, así, la calle Emmanuel fue cerrada en agosto de 1999. En efecto, la calidad del subsiguiente paisaje viario parece ser altamente importante en lo que respecta a cuan atractivo resulta un esquema de este tipo.

En el caso de la Estrategia de Transporte de Oxford (Oxford, UK), la limitada financiación y los continuos problemas con el sistema de alcantarillado de la ciudad, presentaron grandes dificultades al final trabajo de “cosmética” urbana, el cual contribuye significativamente a la popularidad del centro de la ciudad.

Por el contrario, en el caso de la iniciativa en el centro de la ciudad de Shrewsbury (ciudad de unos 70.000 habitantes, localizada en el oeste de Inglaterra), ésta recibió un premio del Real Instituto Británico de Planeación Urbana (Royal Town Planning Institute), junto con financiación por parte del Departamento de Transporte, para introducir

diversas medidas de reasignación de espacio viario (tales como estrechamiento de calzadas viarias y ampliación de aceras para peatones) en el contexto de un rediseño del paisaje urbano y relanzamiento del centro de la ciudad (Surl, 2000). Este esquema ha sido exitoso en la mejora de las condiciones para peatones y otras clases de tráfico prioritario, mientras el tráfico general entrando al área de regulación ha caído en un 34%, sin haberse aplicado ninguna restricción de tráfico explícita.

El caso de New York es uno de los más relevantes en el contexto mundial en lo que respecta al uso del “urbanismo táctico” como mecanismo para una reasignación del espacio viario urbano. En la visión sustentable del Plan Estratégico de Nueva York, PlaNYC 2030, cuya formulación e inicio de ejecución se dio durante la Alcaldía de Michael Bloomberg (2002-2013), se planteó una reconfiguración del concepto de movilidad en las calles de la ciudad, con una política prioritariamente peatonal. Su nueva propuesta para peatonalizar un tramo considerable de Broadway (Broadway entre calles 47 y 42 –Times Square-, y Broadway entre calles 35 y 33 –Herald Square-) sigue la tendencia estratégica en áreas centrales de diversas ciudades del mundo, donde se suele introducir un nuevo perfil urbano para disuadir el uso del automóvil, realzando las vías peatonales, los espacios públicos y su valor cultural.

Entonces unas 356.000 personas cruzaban el Times Square diariamente, esto es unas 4,5 veces más que la gente que va en automóvil, sin embargo, sólo el 11% del espacio –del perfil- estaba dedicado a los peatones. El Plan interviene puntos como Times Square y Herald Square, ambas “plazas” son ejes principales que canalizan el tráfico entre la zona norte y sur de la isla de Manhattan (desde Central Park a Madisson Square) y los de mayor congestión.

Figura 7. Reasignación de espacio viario en Time Square, New York, EEUU.



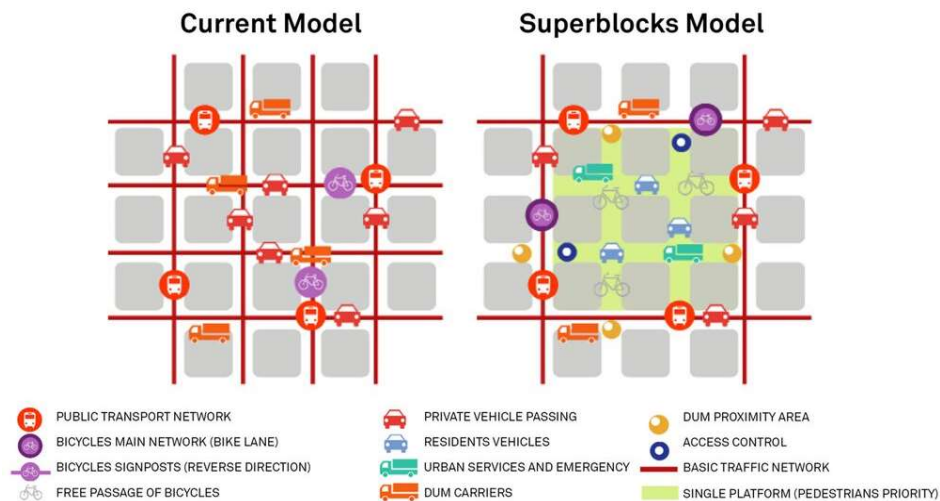
Fuente: Naidar.com

El caso de las “Super-manzanas” de Barcelona es otro de especial relevancia en el contexto internacional.

El concepto de Super-manzanas es en realidad bastante simple y fácil de implementar. Se toman conjuntos de nueve manzanas y se agrupan todas ellas en una sola, la denominada supermanzana. Las manzanas que quedan en el interior solo serán utilizadas por peatones, bicicletas y tráfico de los residentes. Cada Supermanzanas cubre un área de aproximadamente 400 × 400 metros con alrededor de 5000 a 6000 habitantes. El único tráfico motorizado que aún se permite dentro de las Supermanzanas es el tráfico de las personas residentes, los taxis y los camiones de reparto a una velocidad máxima de 10 km por hora. De esta manera, apenas habrá tráfico dentro de las Supermanzanas, lo que hará que las calles sean mucho más accesibles para los peatones.

Fue en 1987 cuando el entonces director de los servicios de Medio Ambiente del Ayuntamiento de Barcelona, Salvador Rueda, posteriormente director de la Agència d’Ecologia Urbana, presentó la idea. Desde 1993 se han tomado acciones en el distrito de Ciutat Vella y luego en Gràcia. El programa de supermanzanas basa principalmente sus directrices y criterios en diferentes planes y compromisos sectoriales municipales: el Plan de Movilidad Urbana 2013-2018, el Compromiso de Barcelona por el Clima, el Plan del verde y la biodiversidad, el Programa de supermanzanas 2012-2015 y líneas estratégicas del PAM (2016-2019). Recientemente, se han implementado super-manzanas en Sant Antoni y el Poblenou en 2016 y 2018 respectivamente, de una propuesta que incluiría unas 500 intervenciones en toda la ciudad.

Figura 8. El modelo de las “Super-manzanas” de Barcelona



Fuente: *Movilidadconectada.com*

### ***2.4.2 Beneficios y desventajas de su implementación***

Por una parte, entre los beneficios de implementar este tipo de medidas se pueden destacar los siguientes:

Los resultados refuerzan la conclusión general de que un esquema de redistribución del uso de espacio viario bien diseñado y bien implementado, contribuye a la mejora de las condiciones de los usuarios de transporte público, peatones y ciclistas, sin que ello signifique un importante incremento de la congestión en el tráfico general o de otros problemas relacionados con esta. Además, estos esquemas pueden ayudar a lograr una amplia gama de objetivos como los son la reducción de accidentes, la mejora de la calidad del aire, reducir barreras espaciales en los barrios, incrementar la inversión en los negocios locales, hacer más atractivo el entorno de trabajo y vivienda y mejorar la vitalidad de la actividad comercial en la zona.

La factibilidad de expandir el éxito de esquemas locales a iniciativas más amplias es todavía poco clara. Sin embargo, este se constituye en un importante tema de investigación, dado el potencial efecto positivo que tales esquemas pueden tener en cuanto a la reducción del tráfico, regeneración urbana, uso eficiente de los recursos económicos y otras políticas de orden nacional

Por otra parte, entre las desventajas de implementar este tipo de medidas se pueden destacar las siguientes:

Los efectos negativos de un esquema de redistribución del uso de espacio viario con fallos, tanto en su diseño como en su implementación, significan un alto impacto en la movilidad de la zona, en particular, un incremento inusual de la congestión tanto de la zona regulada como de sus alrededores, y con ello, un potencial incremento de los efectos secundarios asociados a la congestión.

Este fuerte incremento de la congestión mantenido en el mediano plazo, indica un fallo en la concepción del esquema (diseño y/o implementación). No obstante, un esquema exitoso siempre implicará un leve aumento de la congestión en el corto plazo, el cual posteriormente, es resuelto con la esperada respuesta de la demanda ante las nuevas condiciones.

## 2.5 Restricción viaria al vehículo privado

La restricción vehicular (en inglés, *Vehicle Restriction*) es una estrategia de gestión de la movilidad dirigida a reducir las externalidades negativas generadas por la alta demanda de viajes realizados en vehículo privado sobre una oferta viaria determinada.

Dicho objetivo se lleva a cabo mediante un racionamiento del uso de la infraestructura viaria disponible para el vehículo privado, (racionamiento que está soportado en el concepto del espacio viario urbano como un bien público escaso que ha de ser usado de manera eficiente), de manera tal que se haga un uso más eficiente de la infraestructura viaria, penalizando el uso generalizado del vehículo privado y favoreciendo el uso del transporte público y los modos de transporte no motorizados (peatón y bicicleta).

En la práctica, esta medida implica restringir la circulación a ciertas horas del día (o ciertos días de la semana) a aquellos vehículos privados identificados con matrículas cuyos últimos dígitos coinciden con un listado preestablecido por la Autoridad Local de Transporte. Dicho listado es desarrollado por la Autoridad Local de Transporte en función del porcentaje de vehículos privados que se desee sacar de circulación diariamente, de lo cual depende directamente el número de días a la semana en los que un mismo vehículo se debe someter a la restricción.

En general, dicha restricción se aplica para ciertos días de la semana (normalmente en días laborables) y en horarios específicos (normalmente en los periodos punta). De esta manera, aunque la restricción permanece vigente durante toda la semana laboral, generalmente la restricción para un mismo vehículo aplica solo un par de días a la semana. No obstante, algunos esquemas de implementación han optado por imponer restricciones a los vehículos particulares aplicadas no solo a los periodos punta sino al día completo (entre las 6:00 am y las 8:00 pm), como es el caso de Bogotá cuya modificación fue introducida en febrero de 2009.

Las implementaciones de mayor interés por su alcance y dimensión, se encuentran en América Latina, a las cuales se hace mayor referencia en este apartado.

Otras implementaciones de carácter especial (dado que no obedecen a una regulación de la movilidad obligada) son realizadas de manera temporal para mejorar la movilidad en la ciudad durante la realización de eventos internacionales que incrementan significativamente y de manera excepcional la demanda de movilidad en la ciudad. Este es el caso de los programas planificados para ciudades como Beijing en 2008 y próximamente Londres en 2012, durante la realización de los Juegos Olímpicos de verano.

### **2.5.1 Algunas experiencias internacionales**

Esta estrategia de gestión de la movilidad es ampliamente utilizada en ciudades de Latino América, en las que, en primera instancia, el objetivo ha sido lograr una reducción de la contaminación ambiental, como es el caso de Sao Paulo, Santiago de Chile y ciudad de México; otras en cambio, como en el caso de Bogotá, el objetivo inicial fue la reducción de la congestión. Posteriormente ha sido protagónico el objetivo de aliviar la creciente congestión de tráfico, lo cual ha significado múltiples implementaciones en la región (Mahendra, 2008).

De los cuatro casos mencionados aquí: como Ciudad de México, Sao Paulo, Santiago de Chile y Bogotá; dos casos, México y Sao Paulo, corresponden a grandes metrópolis mundiales entre los 18 y 19 millones de habitantes respectivamente, y otros dos casos, Santiago de Chile y Bogotá, corresponden a ciudades de tamaño medio para el contexto mundial, entre los 6 y 8 millones de habitantes respectivamente.

El éxito de los diferentes esquemas implementados varía considerablemente, en gran medida, ello depende de las características propias con las cuales fueron implementados.

En Mahendra (2008), se presentan los resultados de una encuesta realizada a servidores y funcionarios públicos, académicos y expertos consultores en transporte, en la cual se muestra que los casos de Sao Paulo y Bogotá presentan resultados exitosos en cuanto a reducción de la congestión y la contaminación ambiental. El caso de Santiago de Chile presenta resultados mixtos y un limitado efecto sobre la congestión y la contaminación ambiental. Finalmente, el caso de la ciudad de México es catalogado como un fracaso con su muy limitado efecto sobre la congestión y la contaminación ambiental.

A continuación, se hace una revisión de estos cuatro principales casos latinoamericanos, los más destacados entre más de una veintena de implementaciones en funcionamiento en diversas ciudades latinoamericanas.

#### **2.4.1.1 El caso de la ciudad de Sao Paulo**

Una de las más metrópolis más grandes del mundo (con una población de unos 11 millones de habitantes en su área municipal, unos 19 millones en el conjunto de su área metropolitana, y unos 6 millones de vehículos) implementó la restricción vehicular por primera vez en 1996 con el objetivo de reducir la contaminación ambiental y posteriormente se implementó de manera permanente desde 1997 con el objetivo de aliviar la congestión de tráfico.

La experiencia en restricción vehicular de Sao Paulo, ha sido catalogada como positiva, lo cual puede ser atribuible a la mayor conciencia medioambiental en la toma de decisiones en el Estado de Sao Paulo (Hochsteller and Keck, 2004). Prueba de ello es que en una encuesta realizada a principios de los años noventa, el 85% de los encuestados estaba de acuerdo en que se implementaran

medidas para reducir el impacto negativo del tráfico en el medio ambiente y que ante la primera prueba piloto de una restricción vehicular voluntaria implementada en 1995 el 38% de los conductores participaron aun cuando no era obligatorio (Jacobi et al., 1999).

El restricción vehicular implementada en Sao Paulo en 1996 por el gobierno local del municipio de Sao Paulo y ahora orientada también a una reducción de la congestión, hizo posible una reducción del 20% de la flota de vehículos particulares circulando en el área metropolitana entre las 7:00 am y las 8:00 pm de días laborales, basado al igual que en otras ciudades, en un listado de matrículas predeterminado por la autoridad local de transporte que identifica los vehículos a partir del último dígito de la matrícula.

En 1999 la medida se dejó implantada de manera permanente, y se pasó de una restricción de día completo a una restricción en periodos punta de 7:00 am a 10:00 am y 5:00 pm a 7:00 pm. y aplicable solo al centro urbano. Esto hizo posible una reducción de la congestión del 14% los dos primeros años de implementación (Viegas, 2001). Resultados que incrementaron la aceptación de la medida por parte de los ciudadanos.

En la actualidad (2019) la medida se encuentra vigente, y el debate sobre su efectividad con respecto a la congestión y la contaminación continúa. Los principales argumentos en contra tienen que ver con su efecto en el incremento del parque automotor con el fin de algunas familias de evadir la medida mediante la compra de un segundo automóvil y la necesidad de acompañar esta medida de un fortalecimiento del transporte público.

#### **2.4.1.2 El caso de la ciudad de Bogotá**

La medida se implementó en 1998, enfocada hacia la reducción de la congestión, y no en principio hacia la reducción de la contaminación ambiental como ocurrió en otras ciudades latinoamericanas.

La restricción aplicaba en toda la ciudad para los automóviles particulares, en los periodos punta tanto de la mañana como de la tarde en horarios 7:00 a 9:00 am y 5:30 a 7:00 pm. Esto con el objetivo de que se produjera una modificación en las horas de salida de una parte de los vehículos privados implicados en los viajes de movilidad obligada. La medida significó una reducción del 40% del total de vehículos circulando diariamente en los horarios de restricción (Breithaupt y Fjellstrom, 2002). Ello implicaba que a cada vehículo particular se imponía la restricción durante dos días de la semana laboral.

A partir del año 2001 la medida extendió su horario a tres horas, tanto en el periodo punta de la mañana como en el de la noche, y además, se incluyó en la restricción al transporte público y el taxi, dada la gran sobreoferta de dichos servicios que para entonces, operaban sin planificación alguna ni regulación efectiva por parte de la autoridad local.

A partir del año 2009, la medida extendió su horario al día completo (entre las 6 am y las 8 pm), y se mantuvo el sistema de rotación de matrículas vigente, en el cual, un mismo vehículo particular tenía restringida su circulación dos días de la semana laboral. Bajo este esquema los buses del transporte público tienen restricción dos días de la semana durante 8 horas diarias (entre las 9 am y las 5 pm), con lo cual pueden operar durante el periodo punta. Los taxis tienen restricción 1 día a la semana entre las 5 am y las 9 pm.

Las cifras de la Alcaldía Mayor de Bogotá del año 2009 ya indicaban que la ampliación de la medida permitía sacar de circulación diaria al 40% del parque automotor, es decir, a unos 530 000 autos, aproximadamente.

La ciudad de Bogotá además ha sido la pionera en la región en implementar lo que se conoce como “el día sin automóvil”, un día específico del año en el cual la restricción vehicular rige para la totalidad de los vehículos. Dicha medida es adoptada por cada vez más ciudades en la región.

En la actualidad (2019) la medida de restricción vehicular denominada “pico y placa” se encuentra vigente. Para los vehículos particulares opera de lunes a viernes entre las 6:00 y 8:30 am y las 3:00 y 7:30 pm, los días laborales pares no circulan las matrículas finalizadas en 2, 4, 6, y 8 y en los días laborales impares no circulan las matrículas finalizadas en 1, 3, 5, 7 y 9. La medida también aplica para el transporte público colectivo tradicional, el transporte público individual taxi y el transporte especial, cada uno de los cuales tiene un esquema específico.

#### **2.4.1.3 El caso de la ciudad de Santiago de Chile**

La restricción vehicular en Santiago de Chile fue implementada como respuesta a la congestión de tráfico y la contaminación del aire en 1986, convirtiéndose así en la primera medida de este tipo en Latinoamérica.

La medida limita la circulación del 20% de los buses, taxis y vehículos privados entre las 6:30 am y las 8:30 pm en días laborables, basado en la coincidencia del último dígito de la matrícula (placa) con un listado previamente elaborado por la autoridad local de transporte (Bull, 2003).

Aunque inicialmente la medida fue planteada solo para los días de extrema contaminación ambiental, posteriormente fue aplicada de manera permanente en los nueve meses de mayor riesgo por contaminación ambiental entre los meses de marzo y diciembre. En ocasiones especiales, en un día de contaminación ambiental extrema, una cantidad mayor de vehículos (cerca del 40% del total) es objeto de una restricción de mayor duración.

Al igual que en el caso de Bogotá, se ha implementado un sistema de rotación del listado de matrículas con restricción para cada día, de manera que al no tratarse de un listado fijo, esto podría desestimular a aquellos ciudadanos que se planteen comprar un segundo automóvil con matrícula (placa) diferente para evadir la restricción.



Por otra parte, desde el año 2001 los vehículos privados que disponen de convertidores catalíticos han sido eximidos de cumplir con la restricción, como una política para estimular la renovación del parque automotor de la ciudad hacia uno de energías más limpias o al menos, menos contaminantes. No obstante, dicha excepción ha sido controversial, dado que fomenta la compra de vehículos, aunque estos tengan un menor impacto ambiental, y por otra parte, porque resulta inequitativa con aquellos conductores de medios-bajos ingresos que no disponen de dinero para comprar un automóvil nuevo y por lo tanto se ven sometidos a cumplir la restricción (Zegras y Gakenheimer, 2000).

La implementación de la medida ha significado una importante reducción en el porcentaje de vehículos circulando diariamente en los periodos punta, pero el incremento de la flota de vehículos de la ciudad (cerca del 10% anual) sigue dificultando importantes logros tanto en la gestión de la congestión como en la mitigación de la contaminación del aire que esta produce.

Con el paso de los años, el número de automóviles equipados con convertidor catalítico superó a los tradicionales y en la actualidad estos últimos forman un bajo porcentaje del total.

A partir de 2008, el número de cifras asignadas a cada día pasó de 2 a 4 para compensar la disminución de automóviles no catalíticos.

#### **2.4.1.4 El caso de la ciudad de México**

La restricción vehicular en la ciudad de México inició en 1987 como una iniciativa voluntaria (promovida por un grupo de acción denominado “Mejora tu ciudad”) a partir de la cual cada propietario de vehículo privado evitaría usar su vehículo un día de la semana laboral, aunque la medida tuvo buena aceptación inicialmente, la medida no fue promovida de manera efectiva.

En 1989 el Gobierno Federal del Distrito de la Ciudad de México implementó oficialmente la restricción vehicular con el propósito de enfrentar la difícil situación de contaminación del aire en la ciudad. La medida implicaba la restricción para un 20% del total de vehículos privados circulando en un día laboral entre las 5:00 am y las 10:00 pm., con el objetivo de reducir al mismo tiempo la congestión, la contaminación y consumo de combustible (Molina y Molina, 2002).

Posteriormente en 1990, después del estudio de los favorables resultados iniciales en cuanto a reducción de consumo de combustible e incremento de la velocidad media; la medida fue establecida como permanente, como parte del Programa Integral Contra la Contaminación Atmosférica –PICCA-. La medida implicaba la restricción para cada vehículo privado durante un día de la semana laboral, y posteriormente, para hacer más efectivos los resultados ambientales, fue extendida a todos los vehículos del área metropolitana, incluyendo transporte público, taxis y camiones.

Según datos del gobierno mexicano del año 1995, un 22% de los conductores optó por la compra de un segundo vehículo con una matrícula diferente que le permitiera usarlo el día en el cual su primer vehículo estaba sujeto a la restricción, lo que condujo a la inesperada consecuencia, por parte de la administración local, de un incremento en el total de vehículos-km viajados en la ciudad (Eskeland y Feyzioğlu, 1995).

Como consecuencia de dicho comportamiento por parte un sector de los conductores, el potencial de reducción del impacto ambiental perseguido por la medida, fue por tanto reducido, dado que los vehículos secundarios, en tanto que debían ser baratos para el propietario, eran de mayor antigüedad y producían mayor contaminación. Por otra parte, se identifican problemas de equidad dado que solo los conductores de bajos y medios ingresos de la ciudad se veían obligados a cumplir con la restricción mientras los de altos ingresos podían evadirla haciendo uso de un segundo vehículo.

Posteriormente, como respuesta a tal situación que dejaba constante la problemática de la calidad del aire en la ciudad, la restricción fue modificada y se determinó que los vehículos privados con una antigüedad mayor a 1993 debían cumplir con la restricción al menos dos días de la semana laboral, los vehículos privados con modelos posteriores a 1993 estaban sometidos a la restricción un día de la semana laboral, y los más nuevos, es decir, los manufacturados después de 1999 no estaban sometidos a la restricción.

Dicha modificación, al igual que el caso de Santiago de Chile, generó una modernización de la flota de vehículos circulando en la ciudad. Por otra parte, implicó que menos vehículos estuvieran sometidos a la restricción, con lo cual ya para el año 2003, la reducción de vehículos circulando diariamente que en inicios de la medida era del 20% ahora era solo del 7,6%, lo cual era significativamente menor respecto de su alcance cuando la medida fue adoptada en 1989 (SMA, 2004).

Los resultados de la medida implementada en ciudad de México, en lo que respecta a reducción de la contaminación y la congestión de tráfico son considerados muy precarios (Mahendra, 2004).

### ***2.5.2 Beneficios y desventajas de su implementación***

De presentarse una correcta implementación, adecuada al caso particular, y en compañía de estrategias complementarias, este instrumento puede generar múltiples efectos positivos como los siguientes:

- Una reducción del número de vehículos circulando durante el horario en el cual rige la medida
- Una reducción de la contaminación del aire, asociado a dicha reducción del volumen de tráfico

- Una reducción de la accidentalidad, asociada a dicha reducción del volumen de tráfico
- Una promoción del transporte público como alternativa competitiva al vehículo privado
- Una promoción de la movilidad no motorizada (peatón y bicicleta) para trayectos de corta distancia
- Una mayor disposición por parte de los ciudadanos a aceptar posteriores medidas de gestión del tráfico que penalicen al vehículo privado, en tanto que se adaptan a un marco regulatorio especial, que rompe con el concepto de la libertad del uso y disfrute sin restricción del automóvil como bien privado.

Por otra parte, entre las desventajas que se pueden presentar al implementar este tipo de medidas se pueden destacar las siguientes:

La medida no tiene en cuenta una la diferente importancia de los diferentes tipos de viaje, y con ello pierden efectividad a lo largo del tiempo a medida que los propietarios de vehículos privados se incrementan. (Jones and Hervik, 1992).

Diversos sectores de la economía argumentan el impacto negativo que esta medida tiene en la economía de la ciudad, dada la restricción a la movilidad de los potenciales consumidores de bienes y servicios.

En determinados casos (como ha ocurrido en ciudad de México y Sao Paulo) puede fomentar la compra de un segundo automóvil con lo cual se aumenta la tasa de motorización en la ciudad. Además, en ocasiones por tratarse de un vehículo adicional para ser usado solo ciertos días, las familias optan por uno de muy bajo coste, lo que implica mayor antigüedad, con lo cual el aporte a la contaminación es mayor. La compra de una motocicleta también es considerada (como en el caso de Bogotá), cuando este medio de transporte no está sujeto a dicha restricción, y debido también a su bajo coste.

En los casos del contexto latinoamericano, la restricción vehicular no está compensada con la oferta de un transporte público de calidad que actúe como alternativa competitiva para aquellos usuarios del vehículo privado que opten por el transporte público. Con lo cual la demanda cautiva de un transporte público de mala calidad termina por ser incrementada y los indicadores de insatisfacción de los usuarios se incrementan.

## 2.6 Carril de alta ocupación

En primer lugar, el Carril de Alta Ocupación (en inglés, *High-Occupancy Vehicle Lane*, en adelante HOV), entendido como aquel que solo puede ser usado por vehículos con una ocupación mínima de dos personas, es un instrumento más utilizado en las ciudades y entornos metropolitanos norteamericanos que en el contexto europeo y aún más con respecto al contexto latinoamericano, no obstante resulta interesante abordar el estudio de sus características y la posibilidad de implantaciones en otras ciudades.

La definición del estatus del carril HOV puede variar según la localización, cuyo requisito puede ser como mínimo una ocupación de conductor+1, o de conductor+2, y por su parte al hecho mismo de compartir vehículo se le puede clasificar como una estrategia TDM denominada Carpool o coche compartido.

De esta manera el uso de este carril preferente está destinado a los autobuses de transporte público y a los vehículos particulares que cumplen los mínimos requeridos de ocupación.

Por otra parte, además del criterio de ocupación se puede establecer otro relacionado con la hora del día en la que dicho carril actúa en calidad de HOV, ya que en ciertos casos se trata de una operación a tiempo completo, mientras otros casos contemplan la posibilidad de habilitarlo como carril HOV solo en las horas punta, mientras en las horas valle puede ser usado por el conjunto de los usuarios de la vía sin restricciones.

Figura 9. Carril para vehículos de alta ocupación (HOVL) en Washington, EEUU.



Fuente: *Wikipedia.org*. HOVL, Interstate 5 in Seattle, Washington, United States

En lo que respecta a Estados Unidos y Canadá se estima que el porcentaje de vehículos con alta ocupación es de solo el 7% con respecto a aquellos con un único ocupante, lo cual implica que la velocidad y por tanto el tiempo de viaje en un carril HOV (asumiendo bajo nivel de congestión en este) es notoriamente mejor en los periodos punta en que los otros carriles tienen altos niveles de congestión y demoras, a la vez que potencia, en cierto punto de optimalidad, una

mayor movilidad de viajeros en un menor número de vehículos con la reducción de externalidades que ello conlleva, en lo que respecta al consumo energético y la emisión de contaminantes.

En otras palabras, el objetivo inicial del HOV es estimular a la gente a compartir coche o a tomar el transporte público.

Por otra parte, el valor de la prioridad del HOV depende del criterio y los supuestos usados en la evaluación (Wellander and Leotta, 2001), así las medidas de prioridad del HOV pueden ser justificadas según una asignación más eficiente y equitativa del espacio viario (los viajeros que comparten coche o usan el transporte público ocasionan menos congestión en el sistema que otros, y esto se les ve retribuido con menores demoras en su tiempo de viaje), según un uso más eficiente de la capacidad viaria (el carril HOV tiene la posibilidad de transportar más viajeros que un carril convencional en el mismo corredor), y según la idea de convertirse en un incentivo para un cambio en la elección modal

Otro aspecto a evaluar respecto a la implementación de un carril HOV tiene que ver con este sea implantado en un carril ya existente, o que por otra parte sea implantado en un nuevo carril por ampliación de la sección de la vía.

Algunos autores como en Leman, Schiller y Pauly, (1996) argumentan su oposición a la utilización de suelo para ampliar la capacidad de la vía (aumento de la sección) ya que el aumento de la oferta viaria conlleva o estimula el aumento de los viajes pendulares de media y larga distancia, mientras otros autores como en Orski (2001) se oponen en el mismo sentido pero argumentando lo innecesario de ocupar nuevo suelo para un carril HOV cuando en la mayoría de los casos este es subutilizado por los usuarios, dado que a menudo tras su implementación se tardan muchos años en desarrollar todo su potencial logrando una utilización óptima, dado que afecta decisiones de largo término como la tenencia de coche y la localización de vivienda y trabajo.

En segundo lugar, el Carril de Alta Ocupación con Peaje (en inglés, *High-Occupancy Toll Lane*, en adelante HOT), es una evolución del carril de alta ocupación o *High-Occupancy Vehicle Lane* (HOV), dado que rara vez los carriles HOV (en los ejemplos de ciudades norteamericanas) logran maximizar su eficiencia dado el bajo porcentaje de vehículos de alta ocupación.

Esto ha significado que un cierto número de ciudades hayan considerado la posibilidad de que vehículos privados con baja ocupación (es decir un solo viajero) puedan comprar el derecho a usar el carril HOV por medio del pago de una tasa económica (peaje de cobro electrónico), pero siempre regulando que la velocidad del carril HOV no caiga sensiblemente.

Los criterios con los cuales se ha planteado este instrumento tienen que ver con:

- Proveer la posibilidad a ciertos usuarios de vehículos de baja ocupación dispuestos a pagar una tasa, de reducir sus tiempos de viaje mediante el uso de los carriles preferentes

- La oportunidad de mejorar el recaudo el cual puede ser usado para la mejora del transporte público
- Aumentar la eficiencia operativa de los carriles preferentes, dado que a menudo estos no llegan a maximizar su eficiencia derivada de la relación capacidad/uso

Esto implica una gestión del conjunto del tráfico del corredor dado que los precios de uso del carril preferente pueden ser fijos y establecidos para determinadas franjas horarias del día y días de la semana, o bien pueden variar en función del nivel de congestión existente mediante la información en tiempo real a los usuarios. Los carriles HOT utilizan sofisticados sistemas electrónicos de detección y cobro, y sistemas de información de tráfico que hacen posible la variación del precio a los usuarios, de manera que la velocidad del carril HOT no sea vea afectada más allá de los límites deseados.

### 2.6.1 Algunas experiencias internacionales

Algunas de las iniciativas de esta medida en Estados Unidos se resumen a continuación:

Tabla 4. Casos de implementación de Carril HOT en Estados Unidos

Estado	Localidad/Implementación	Proyecto
California	San Diego/1996	Carriles HOT en la I-15: Los peajes cambian dinámicamente desde 50 centavos hasta \$4 de acuerdo al nivel de flujo de tráfico en los carriles. Los ingresos por el peaje de la I-15 están comprendidos entre \$1,3 a \$2,2 millones por año fiscal. <a href="http://ops.fhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/proitv_pes/hovhotlanes.htm">http://ops.fhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/proitv_pes/hovhotlanes.htm</a>
California	Alameda County	Carriles HOT en la I-880 y la I-680: La Interestatal 880 tiene el volumen más elevado de tráfico de camiones en Alameda. <a href="http://www.accma.ca.gov/pages/Projects.aspx">http://www.accma.ca.gov/pages/Projects.aspx</a>
California	Orange County. En funcionamiento desde 1995	Carriles HOT en la SR-91: Los peajes se recolectan con <i>transponders</i> llamados AVI (Automated Vehicle Identification) y varían con la hora del día del viaje y la ocupación del vehículo. Todos los automóviles y motocicletas que están equipados con un AVI y posean una cuenta pre-pago son idóneos para usar los carriles. Los acuerdos de Interoperabilidad se establecen entre todas las infraestructuras de peaje de California ofreciendo opciones electrónicas/AVI de pago de "peaje bajo una única marca, "FasTrak*" <a href="http://www.91expresslanes.com/">http://www.91expresslanes.com/</a>

Colorado	Denver, en funcionamiento desde 2006	Carriles HOT en la I-25: Los viajeros usualmente pagan entre \$0,50 y \$3,25 por viaje, dependiendo de la hora del día para este recorrido de 7 millas. El servicio de buses es uno de los mejores ya que alcanzan su límite de velocidad total. <a href="http://www.flhwa.dot.gov/policy/otps/vpqrt/sec1.htm">http://www.flhwa.dot.gov/policy/otps/vpqrt/sec1.htm</a>
Florida	Miami-Dade County	Carriles HOT en la I-95: Todos los proyectos incluyen algunas mejoras (rampas nuevas, etc.) para los carriles con flujos combinados, los cuales proveen un 20% de incremento de la capacidad en horas punta, sin tener que ampliar la I-95. Los beneficios del proyecto se estiman en \$3,77 billones (ahorros en el tiempo de viaje y reducción de los costes de operación del vehículo). <a href="http://ops.flhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/proitypes/hovhotlanes.htm">http://ops.flhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/proitypes/hovhotlanes.htm</a>
Minnesota	Minneapolis, en funcionamiento desde 2005	Carriles HOT en la I-394: Los datos del desempeño preliminar del I-394 durante los primeros seis meses de operación indican que los viajes tarifados por semana (prom/máx) serían 15.918/19.493, y sus ingresos por semana \$12.484/\$15.613. <a href="http://www.wsdot.wa.gov/Projects/SR167/HOTLanes/OtherHOTlanesProjects.htm">http://www.wsdot.wa.gov/Projects/SR167/HOTLanes/OtherHOTlanesProjects.htm</a>
Texas	Houston/1998 "QuickRide" pricing program. Se implantó sobre carriles HOV existentes de la I-10 en Noviembre 2000	Carriles HOT en dos corredores radiales (I-10) Vehículos con un solo ocupante no se les permite usarlos. Los vehículos con dos ocupantes pueden usarlos durante las horas punta pero pagando \$2,00 por viaje, mientras que los vehículos con más ocupantes continúan viajando gratis. <a href="http://ops.flhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/proitypes/hovhotlanes.htm">http://ops.flhwa.dot.gov/tolling_pricing/value_pricing/proitypes/hovhotlanes.htm</a>
Washington	Puget Sound Region	Carriles HOT en la SR-167: Los detectores del tráfico bajo el pavimento envían a un computador los datos en tiempo real y automáticamente se ajusta el precio en las señales para mantener la demanda en movimiento. Las tarifas de peaje mínimas y máximas para el 2005 se estimaron en \$0,60 y \$1,20, respectivamente. Los peajes se incrementan durante congestión severa. <a href="http://www.wsdot.wa.gov/Projects/SR167/HOTLanes/OtherHOTlanesProjects.htm">http://www.wsdot.wa.gov/Projects/SR167/HOTLanes/OtherHOTlanesProjects.htm</a>

\* FasTrak es un sistema de recolección usado en carreteras de peaje en California que permite a los conductores conducir por carriles designados "FasTrak Only" sin detenerse. El peaje se deduce automáticamente de una cuenta prepago.

Fuente: Salas, M. (2008)

### 2.6.2 Beneficios y desventajas de su implementación

A pesar de las buenas intenciones de maximizar la eficiencia del carril preferente, lo que ha llevado al desarrollo del carril HOT (en el cual los vehículos de baja ocupación también pueden circular siempre que paguen el peaje), en el presente documento se destaca la importancia de que prevalezca en estos sistemas de carriles preferentes, el principio de favorecer el uso del coche compartido (alta

ocupación) y de los sistemas de transporte público, como ocurre en el carril HOV. De manera que quienes hagan un uso más racional del vehículo privado y quienes hagan uso de los sistemas de transporte público, sean premiados con una mejora (reducción) de su tiempo de viaje.

Esto dado que, por el contrario, al permitir que el carril preferente sea usado por vehículos con baja ocupación (previo pago del peaje) no solo se está premiando su conducta en un corredor específico, sino que se disfraza en ello un fin meramente recaudatorio, que en este caso choca directamente con el objetivo de regular la congestión de tráfico, en el marco de fomentar una movilidad más sostenible en entornos urbano-metropolitanos.

Así, en lo que respecta a los carriles para vehículos de alta ocupación (HOV), la siguiente tabla resume los beneficios y los pondera de acuerdo a su grado de impacto.

Por una parte, en los que respecta a los potenciales beneficios de implementar este tipo de medidas se pueden destacar los siguientes:

Con relación a los aspectos más operativos de su implementación, los cuales varían de acuerdo a la casuística, vale anotar el hecho de que autores como [Pratt \(1999\)](#) y [Turnbull \(2001\)](#) sugieren que los carriles HOV resultan mucho más eficientes en la reducción del uso del vehículo privado, cuando son implementados en grandes áreas urbanas sobre corredores congestionados que comunican con un gran distrito de empleos o polígonos industriales, y haciendo énfasis en su optimización en las horas punta con la prestación de un eficiente servicio de transporte público de alta frecuencia (entre 2 y 4 minutos).

Estas condiciones garantizan a los usuarios del carril HOV (sea en coche compartido o en transporte público), un porcentaje de reducción del tiempo de viaje que hace atractiva a esta opción frente a otras disponibles.

En general, los beneficios derivados de la implantación de un carril HOV, tienen que ver con el incremento de la velocidad y la seguridad para los viajeros que lo usan. Por otra parte, al verse reducido el tiempo de viaje de los usuarios del carril HOV, se genera un escenario más favorable para que ocurra un cambio en la elección modal de la demanda potencial, de manera que se materialice en un mayor número de usuarios. Finalmente, la reducción de las diversas externalidades negativas asociadas al uso generalizado del vehículo privado con baja ocupación, resulta un argumento contundente para aquellos casos en los que la implementación tiene éxito.

Por una parte, en los que respecta a las potenciales desventajas de implementar este tipo de medidas se pueden destacar las siguientes:

En lo que respecta a sus desventajas se puede citar su efecto negativo sobre la estructura de usos del suelo urbano y metropolitano ya que al dar facilidad al uso del vehículo privado puede fomentar en cierta medida el uso del mismo para



viajes pendulares (entre vivienda y trabajo/estudio) y potenciar un crecimiento urbano disperso.

Por otra parte, en lo que respecta a implementaciones de carriles HOV en las cuales no solo se aumenta la capacidad viaria mediante la ampliación de la sección para incorporar un carril más, sino aquellas en las que dicho carril se ubica en una plataforma elevada por encima de la vía tradicional (ejemplo de este tipo es el carril HOV en el Harbor Freeway en Los Ángeles, California), cabe anotar que no solo en estos está siempre involucrado un aumento de la oferta viaria, con sus bien conocidas consecuencias, lo cual es opuesto a una política orientada hacia una movilidad sostenible, sino que además, las grandes inversiones en la nueva oferta de infraestructura viaria no se ven compensadas con la mejoras en movilidad, aspectos estos por los cuales actuaciones de este tipo son duramente cuestionadas en el presente documento.

Por lo cual, se opta de manera preferente, por aquellas actuaciones en las cuales se hace uso de parte de la infraestructura viaria existente.

## **2.7 Carril Bus**

En primer lugar, el objetivo principal de un Carril Bus (en inglés “*Bus Lane*”) es dar prioridad al autobús y reducir su tiempo de viaje, en especial en aquellas zonas donde el nivel de congestión es alto.

Un carril bus no necesariamente debe tener una gran longitud, pues en ocasiones resulta muy útil su implementación solo en ciertas zonas de la ciudad en las que debido a su alto nivel de congestión reducen drásticamente la velocidad del autobús y esto se ve reflejado en su velocidad comercial global.

No obstante ciudades como Barcelona y Singapore han optado por la implementación de una amplia red de carriles bus, lo que ha constituido un aporte importante de cara la consolidación de una política local de prioridad al transporte público.

El aspecto operacional más importante en este tipo de medidas, es la búsqueda de la disminución de los tiempos de viaje en transporte público, y las características del tipo de implementación (en cuanto a tipo de segregación, señalización, sistema de recaudo, paradas, preferencia semafórica, control y gestión, etc.) estará en función del grado de reducción del tiempo de viaje que se quiera lograr –al igual que de la demanda a servir-, evolucionando así desde su aplicación más sencilla hasta modelos más complejos como el BRT (Bus Rapid Transit).

La aplicación más sencilla del carril bus, se puede llevar a cabo destinando el carril derecho de cualquier vía para el uso exclusivo del transporte público, mediante una correcta señalización de los carriles, sin embargo, la

implementación del carril bus en vías arteriales, generalmente se realiza con carril bus central (en inglés, *Median Bus Lane*), es decir, destinando el carril izquierdo en ambos sentidos para el uso del transporte público e incluyendo mejoras en el diseño urbano, en especial en favor del espacio destinado a los peatones.

Figura 10. Carril bus en Barcelona



Fuente: [www.barcelona.cat](http://www.barcelona.cat)

Los carriles bus centrales como la aplicación más avanzada del carril bus estándar, presentan un mayor desempeño, pero también son objeto de críticas por quienes se muestran más inclinados por la implantación de carril bus estándar en el carril derecho de la vía y con paradas a nivel de acera.

Figura 11. Carril bus central. Santiago de Cali, Colombia



Fuente: Alcaldía de Santiago de Cali

Una de las críticas a los carriles bus centrales tiene que ver con la complicación que se presenta con los giros a la izquierda de aquellos tráfico que discurren paralelos al carril bus y que han de cruzar desde el lado derecho del carril bus.

Otro aspecto tiene que ver la necesidad que tienen los usuarios de cruzar la calle hasta la plataforma de acceso al autobús localizada en el centro del corredor viario (entre las dos calzadas de sentidos opuestos), esto requiere la localización

y adecuada señalización de pasos de peatón adyacentes a las paradas de autobús.

Finalmente, otro argumento tiene que ver con el hecho de que los carriles bus centrales tienen un mayor coste de construcción que los convencionales, el cual aumenta a medida que se pretenden lograr más altas prestaciones (por carriles preferentes en intersecciones complejas, bahías para las paradas, sistemas de información, etc.)

En segundo lugar, el sistema de transporte público basados en buses de altas prestaciones y por vía segregada, conocidos en la literatura técnica como *Bus Rapid Transit* (BRT), es un concepto amplio que abarca una variedad de sistemas de transporte basados en autobuses, que a través de mejoras tanto en la infraestructura como en la programación operativa buscan ofrecer un servicio con mayores prestaciones y niveles de calidad que aquellos ofrecidos por el servicio de las líneas comunes de autobús.

Así, los sistemas BRT, buscan acercarse a las prestaciones de los servicios de transporte ferroviarios urbanos de superficie como el tranvía, pero manteniendo las ventajas en cuanto a ahorro de costes y adaptabilidad de las rutas propia de los sistemas de autobús.

Este tipo de actuación han tomado mucha fuerza en ciudades latinoamericanas, después del exitoso caso de la ciudad de Curitiba (Brasil) en los años 70's, que resultó ser emblemático en su apuesta por este tipo de sistemas basados en autobús y se posicionó a nivel mundial por sus prácticas sostenibles en materia de transporte.

En la actualidad un factor determinante para que se estén poniendo en marcha proyectos BRT en diversas ciudades latinoamericanas tiene que ver con el aspecto financiero, dado que sus costes de implantación son mucho menores que los de un sistema ferroviario (incluidos los de superficie) y el mantenimiento se ve solventado con el recaudo.

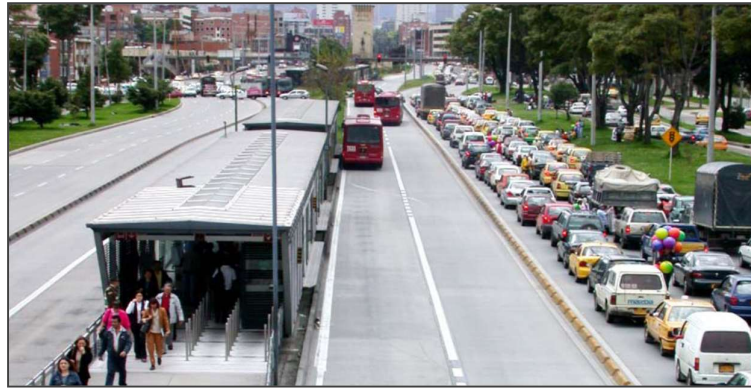
Es claro que desde un análisis de coste-eficiencia la situación es muy favorable ya que los beneficios por mejora de la movilidad en la ciudad están por encima de lo que en un esquema clásico se espera de una inversión de dicho nivel.

Por otra parte, diversos sistemas se están implementando en ciudades tanto de Estados Unidos como de Canadá, en las cuales la eficiencia operativa de estos sistemas ha resultado un factor determinante para la decisión de las administraciones locales, orientada a estructurar o complementar la movilidad masiva de pasajeros.

La popularidad de dichos sistemas se relanzó en el año 2000 con la implementación del sistema BRT de la ciudad de Bogotá denominado "Transmilenio", el cual incorporó grandes mejoras con respecto a su predecesor de Curitiba (Brasil), en particular en lo referente a la disposición de paradas múltiples (con capacidad para recibir hasta 4 autobuses articulados

simultáneamente), puertas de embarque-desembarque múltiples, pago previo y con tarjeta electrónica al ingreso de la parada de autobús, doble calzada viaria con dos carriles por sentido, etc.

Figura 12. Sistema BRT (Transmilenio) de Bogotá, Colombia.



*Fuente: FTA, 2006 y Transmilenio S.A.*

Las principales características de un BRT están relacionadas con:

- Alta frecuencia y servicio durante todo el día similar a las de otros sistemas de transporte masivo como el tranvía moderno, con lo cual servicios expreso que solo sirven durante las horas punta normalmente y a orígenes-destino muy específicos no son considerados en la categoría de un BRT.
- Un carril determinado para su circulación el cual presentará diversos grados de segregación espacial, pero siempre con un alto grado de exclusividad de uso por parte del autobús, el caso más básico de su aplicación es mediante la reserva del carril derecho. Esto es válido tanto en centros urbanos como en vías arteriales y/o periféricas. La aplicación más avanzada de este sistema implica la segregación de los carriles centrales de las principales arterias (el carril izquierdo en cada sentido) con paradas centrales y en plataformas elevadas que dan acceso directo al autobús.
- En ocasiones se trata de una calle en la cual el total de su sección es destinada al uso exclusivo por parte de los autobuses, caso este que comúnmente está asociado a los centros urbanos.
- Un sistema de señalización y de regulación del tráfico que da preferencia a los autobuses. Aspecto es muy importante en lo que respecta a la preferencia en las intersecciones, dado que los tiempos de demora en las intersecciones son significativos y estos pueden ser minimizados considerablemente mediante la prolongación de la fase de verde para el

autobús, o mediante la activación de la luz verde cuando un detector identifica que el autobús se aproxima a la intersección.

- Mejoras en la gestión del tráfico mediante la implantación de elementos de infraestructura de bajo coste que pueden tener un gran efecto en la velocidad y la fiabilidad del sistema, como lo son giros especiales para el autobús e islas reservadas para las paradas entre otros.
- Venta del tiquete por fuera del autobús, dadas las demoras que esto implica además de la distracción que significa para el conductor. Normalmente se espera que un BRT de alto desempeño tenga un sistema de cobro y de registro de billete al usuario previo a la llegada y al abordaje del autobús, generalmente mediante el diseño de paradas especiales capaces de albergar estas actividades. Este sistema permite mejorar los tiempos de subida y bajada de pasajeros.
- Un alto nivel de accesibilidad al sistema. El abordaje a nivel es fundamental tanto para sistemas en los que se aborda en la acera para los cuales se utilizan autobuses de piso bajo, como los sistemas con plataformas elevadas en los que se utilizan autobuses de piso alto.
- Es frecuente el uso de autobuses articulados y bi-articulados para aumentar la capacidad.

### ***2.7.1 Algunas experiencias internacionales***

#### **2.6.1.1 El caso de Curitiba (Brasil)**

El sistema BRT de la ciudad de Curitiba (cuya región metropolitana cuenta con una población aproximada de 2,4 millones de habitantes), es el ejemplo por excelencia de este tipo de sistemas, y, además, juega un importante papel en la mejora de la habitabilidad de la ciudad. Este sistema es uno de los que presenta un mayor uso por parte de sus ciudadanos, aún cuando en su población la tenencia de automóvil es uno por cada tres habitantes, uno de los ratios más altos de Brasil, población que además tiene uno de los ingresos per cápita más altos de la nación. Con todo ello, un 70% de los commuters usan este medio de transporte público para sus desplazamientos.

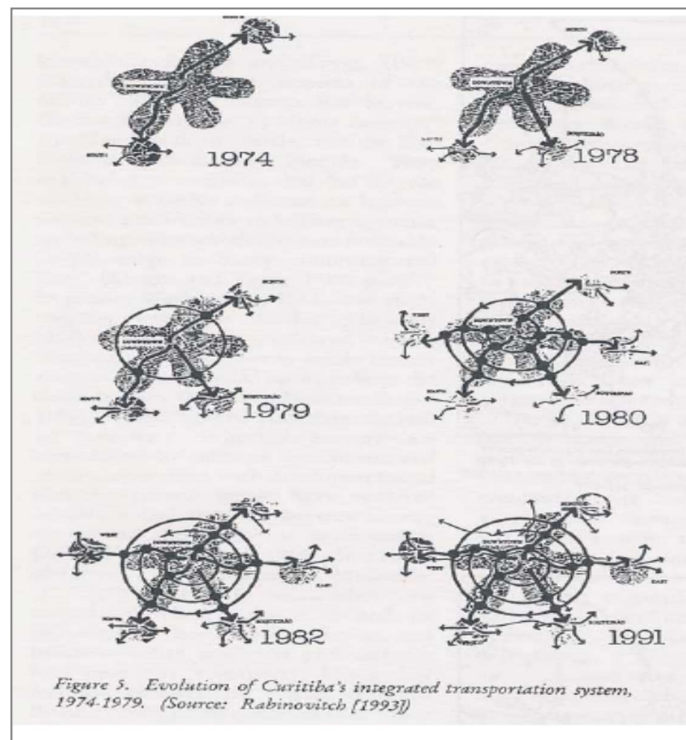
El sistema se desarrolló en los años 70's como producto de un visionario Master Plan realizado en 1965, el cual integraba de manera acertada el transporte público con todos los demás sistemas urbanos, enfocándose en dar respuestas a las necesidades de movilidad del conjunto de los ciudadanos, en lugar de facilitar el desplazamiento de aquellos usuarios del vehículo particular.

Como producto del Master Plan, Curitiba no crecería en todas las direcciones desde su centro, sino que lo haría a lo largo de corredores diseñados de forma lineal, estimulados por la zonificación y las políticas de uso del suelo que

promocionaban el desarrollo residencial e industrial de alta densidad a lo largo de dichos corredores. De esta manera el centro de la ciudad no sería más el destino principal de los viajes, sino un gran intercambiador. De igual manera, el transporte masivo reemplazaría al vehículo privado como el principal medio de transporte en la ciudad, mientras los desarrollos urbanísticos de alta densidad a lo largo de los corredores producirían un alto volumen de usuarios del transporte público. Así mismo, los boulevares previstos en un anterior plan que databa del año 1943, proveerían la sección viaria necesaria para implementar carriles bus exclusivos en los cuales los servicios de bus expreso podrían operar.

El sistema BRT de Curitiba evolucionó por etapas a través de los años, como fases del Master Plan hasta llegar a la situación actual. La Figura 13 muestra la evolución del sistema en el periodo 1974-1991.

Figura 13. Evolución del Sistema BRT. Curitiba, Brasil.



Fuente: MIT (2006), tomado de Rabinovitch (1993)

Está compuesto por un sistema jerárquico de servicios, que incluye rutas de minibuses que circulan por los barrios residenciales, encargadas de alimentar de usuarios a las rutas perimetrales del centro de la ciudad y las rutas interdistritales.

La columna vertebral del sistema está compuesta por el servicio de buses expresos que operan en las cinco arterias que, de manera radial, se desprenden desde el centro de la ciudad.

Dichas arterias cuentan con características especiales (propias de los sistemas BRT en sí) que les permiten altos estándares de velocidad, eficiencia y fiabilidad:

- Planificación integrada
- Carriles de bus exclusivos
- Señalización prioritaria para el autobús
- Pago de tiquete antes de abordar el autobús
- Acceso a nivel del autobús con estaciones en plataforma
- Tarifa integrada que permite transbordos entre líneas con un único pago
- Autobuses de alta capacidad, y rápido embarque/ desembarque
- Variedad de servicios en un mismo corredor.

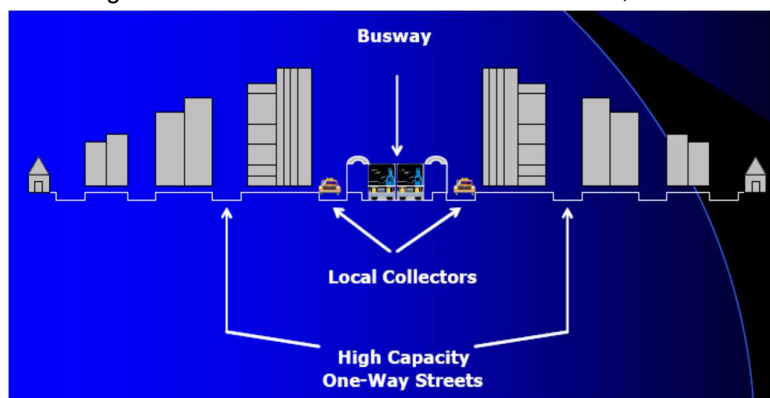
Cada arteria está compuesta por un sistema viario “trinario” que consiste en tres rutas paralelas.

La ruta central es una amplia avenida con un servicio de bus expreso, que opera sobre una vía exclusiva para autobuses de alta capacidad –usando los carriles centrales de la calzada- con paradas regulares, y buses de capacidad estándar, articulados y bi-articulados, el último de los cuales es capaz de transporte hasta 270 pasajeros. Los otros carriles en dicha ruta central, son dedicados al acceso local y aparcamientos. Cabe anotar que, en el pasado, en 1960, se evaluó la construcción de un tren ligero (Light Rail Transit) en estas avenidas arterias, pero los estudios demostraron que dicha opción debía ser descartada por los altos costos que implicaba (FTA, 2009).

Las otras dos rutas exteriores del sistema “trinario”, son calles de un solo sentido con carriles de tráfico mixto junto a un carril bus exclusivo sobre los cuales opera un servicio de bus directo de mayor velocidad con paradas limitadas.

Ambos servicios, el expreso y el directo, cuentan con un sistema de prioridad semafórica en las intersecciones. De igual manera, cuentan con estaciones de características especiales que permiten detenciones entre los 15 y 19 segundos, haciendo más eficiente la operación de embarque/desembarque de pasajeros.

Figura 14. Sistema “trinario” del BRT de Curitiba, Brasil.



Fuente: MIT (2002)

En lo que respecta a la estructura empresarial, el consorcio de transporte provee todos los servicios de transporte público en Curitiba, bajo la guía, y, en concordancia con los parámetros establecidos por la administración local.

Las compañías de autobús que hacen parte del consorcio, reciben una remuneración en función de los kilómetros recorridos en prestación del servicio (previamente planificados), y no, como ocurría con anterioridad, en función al número de pasajeros transportados, sistema que, en el pasado, generaba una malsana competencia entre autobuses que redundaba en un mal servicio al cliente, conductas de conducción agresiva, concentración del servicio en corredores de alta demanda y sin servicio a otras zonas de la ciudad.

Con esta nueva estructura, todas las empresas tienen sus beneficios asegurados y los ciudadanos tienen un servicio de transporte planificado en función de sus necesidades. De esta manera, la administración local paga a cada empresa operadora, aproximadamente un 1% mensual del valor del autobús.

Figura 15. Carril exclusivo, bus articulado y parada “tubo” del sistema BRT de Curitiba, Brasil.



*Fuente: Commons.wikimedia.org. Línea verde Curitiba 2013*

Antes del sistema BRT de Curitiba, los ingenieros de tráfico creían que los sistemas basados en autobuses podrían mover aproximadamente unos 6.000 pasajeros/hora/sentido, en un único carril con una velocidad media de 15 kilómetros por hora (asumiendo distancias normales entre estaciones de unos 500 metros).

Curitiba, usando buses bi-articulados y las diversas facilidades operacionales propias de un sistema BRT (mencionadas con anterioridad), fue capaz de movilizar 15.000 pasajeros/hora/sentido en el periodo punta, con una velocidad media cercana a los 20 km/hora en único carril de tráfico (Hook, 2009). Esta velocidad y capacidad es similar a algunos de los mejores sistemas de tren ligero y de tranvía urbanos. Otros reportes técnicos estiman la capacidad práctica de las arterias del sistema BRT de Curitiba entre los 13.900 y los 24.000 pasajeros/hora/sentido. (FTA, 2004).



El costo de construcción, de solo 2 millones USD por kilómetro, fue una fracción del costo de muchos sistemas de tren ligero, los cuales representan costos mayores a los 20 millones USD por kilómetro.

La porción de viajes que en Curitiba se realizaban en transporte público permaneció sobre el 70% por más de dos décadas (mediados de los años 70's a mediados de los 90's), porcentaje que empezó a disminuir cuando el sistema detuvo su expansión. En la actualidad, la proporción de viajes en transporte público es aproximadamente del 54%, porcentaje aún alto para una ciudad con una tasa de motorización de 400 automóviles por cada 1.000 habitantes. (Hook, 2009).

Los patrones residenciales cambiaron de manera que a la mayor parte de la población se le pudiera ofrecer acceso al servicio de transporte público ofrecido por el sistema BRT sobre las principales arterias. Entre 1970 y 1978, cuando las principales tres arterias fueron construidas, la población de Curitiba en su conjunto tuvo un crecimiento de un 73%, mientras la población a lo largo de las principales arterias creció un 120%.

Ya a inicios de la década del 2000, unos 1.100 autobuses realizaban unos 12.500 viajes por día, sirviendo a una demanda de unos 1,3 millones de pasajeros diarios. Adicionalmente, a las características de buena velocidad comercial y alta fiabilidad del servicio, los habitantes de Curitiba gastaban en transporte solo un 10% de sus ingresos, lo cual es relativamente bajo comparado con el resto del país. (Goodman, Laube y Schwenk, 2006).

Con base en las encuestas a viajeros que data del año 1991, se estimó que las mejoras en el servicio de transporte público derivadas de la implementación del sistema BRT, habían atraído hacia este modo de transporte un número suficiente de antiguos usuarios del vehículo privado que significaba una reducción de unos 27 millones de viajes en vehículo privado al año, con ahorro asociado de unos 27 millones de litros anuales en el consumo de combustibles.

En concreto, un 28% de los usuarios del servicio directo del sistema BRT, habían sido previamente usuarios del vehículo privado para realizar el mismo viaje. Comparado con otras ocho ciudades de brasileras de un tamaño similar, Curitiba usa un 30% menos de combustible per cápita, debido al gran uso que su población hace del transporte público. De igual manera, los bajos niveles de contaminación ambiental de la ciudad de Curitiba, son unos de los bajos a nivel nacional, lo cual también es atribuible al extensivo uso que se hace del transporte público. (Goodman, Laube y Schwenk, 2006).



infraestructura de una envergadura considerable. Las estaciones se caracterizan por el pago de tiquetes al acceso de la estación (no al subir al autobús con se hacía tradicionalmente), plataforma de acceso a nivel del suelo del autobús y puertas de embarque/desembarque automáticas múltiples. Una estación sencilla cuenta con una a cinco plataformas y uno a o dos puntos de acceso. Las estaciones tienen entre 25 y 190 metros de longitud, dependiendo del número de plazas de embarque/desembarque de los autobuses, y usualmente 5 metros de ancho.

- El acceso de los peatones se provee a través de pasos elevados para peatones (puentes para peatones), túneles o intersecciones reguladas con semáforos. Caminos peatonales, plazas y aceras han sido también construidas para mejorar el acceso de peatones y bicicletas.
- En los corredores troncales Transmilenio usa buses articulados de 18 metros de largo y capacidad de 160 pasajeros (48 sentados), y recientemente, en el 2009, empezaron a introducirse autobuses bi-articulados de 27 metros de largo y capacidad de 240 pasajeros. En los corredores alimentadores, se opera con buses estándar de capacidad de 80 pasajeros. Todos los autobuses usan diesel de conformidad con los estándares de emisiones del Euro II.
- Transmilenio usa tecnología de tarjetas inteligentes de prepago, las cuales son chequeadas por los torniquetes de acceso a las estaciones, sin necesidad de contacto.
- Cuenta con un centro de gestión de operaciones equipado con seis estaciones de trabajo, cada una de las cuales está en capacidad de controlar 80 autobuses articulados, los cuales están dotados con sistemas GPS.

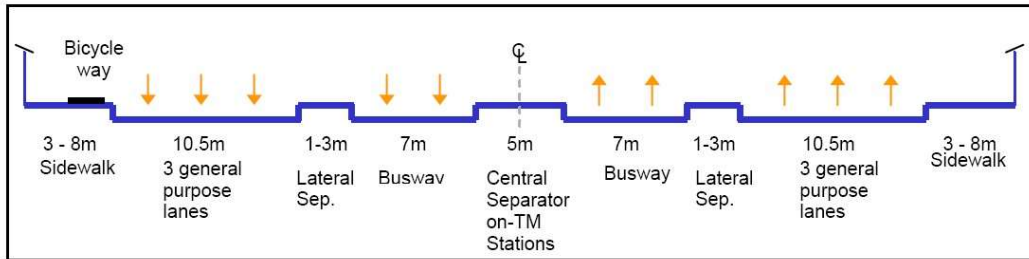
Con la introducción de un servicio especial de paradas limitadas, el sistema BRT de Bogotá, logró una capacidad de operación de 35.000 pasajeros/hora/sentido, y una velocidad promedio de 29 km/hora. El sistema BRT de Bogotá, es uno de los de mayor capacidad a nivel mundial. La más dinámica de sus troncales (Troncal de la Caracas) en periodo punta, llega a prestar un servicio de aproximadamente 45.000 pasajeros/hora/sentido, operando en condiciones de sobrecupo (lo cual significa también una reducción de la velocidad media a unos 19 km/hora según fuentes oficiales), capacidad operativa comparable con la de muchos de los sistemas ferroviarios actualmente en operación alrededor del mundo. (Hook, 2009).

Figura 17. Sistema BRT (Transmilenio): Carriles dobles y sencillos



*Fuente: FTA, 2006 y Transmilenio S.A.*

Figura 18. Sistema BRT (Transmilenio): Sección viaria de corredor troncal con carril doble



Fuentes: FTA, 2006 y Transmilenio S.A.

Cabe anotar, que un sistema estándar de BRT sin carriles de sobrepaso para los servicios expresos (los cuales se localizan frente a las estaciones) proporcionará un máximo de alrededor 13.000 pasajeros/hora/sentido, y, además, la mayoría de los sistemas BRT de alta calidad alcanzan velocidades comerciales de aproximadamente 23 a 30 kilómetros por hora. (ITDP, 2010).

Lograr un sistema de alta capacidad depende de una variedad de características de diseño operacional, incluyendo bahías de parada múltiples en estaciones, servicios expresos y de parada limitada, disposición de carriles de sobre paso frente a las estaciones, vehículos articulados con varias puertas anchas, recaudo y verificación de tarifa fuera del vehículo, abordaje a nivel de plataforma, y optimización de la distancia entre estaciones (ITDP, 2010). Además, en el caso de Transmilenio se destaca la alta frecuencia del servicio, posible gracias a las especificaciones antes mencionadas, alrededor de 280 buses por hora y por sentido, sobre su troncal más dinámico y en su tramo de mayor demanda. (FTA, 2006).

La alta capacidad de movilización de pasajeros de Transmilenio se debe también a su alta capacidad de carga de sus vehículos. Así, mientras el sistema Transmilenio fue diseñado para transportar siete pasajeros de pie por cada metro cuadrado (SDG, 2000), en otros países, como en Estados Unidos, estos ratios asumidos son mucho menores. Esto explica porque, por ejemplo, las estimaciones de capacidad (pasajeros/hora/sentido) de diferentes sistemas de transporte público en el contexto estadounidense de 10.000 a 12.000 para sistemas Bus Rapid Transit, 26.000 para Light Rail Transit y 50.000 para Heavy Rail Transit (TRB, 2003), son menores a las capacidades teóricas formuladas, por ejemplo, por Vuchic (1992), de 15.000, 30.000 y 72.000 respectivamente. Por otra parte, el proceso tradicional en el cual un corredor debe contar con sistema ferroviario para demandas superiores a 15.000 pasajeros/hora/sentido ha sido completamente revaluado después de la implantación del sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá (Levinson, 2003; Hidalgo, 2004; Fulton, 2002; Stockholm Partnerships, 2002), a raíz de lo cual, ahora solo parece necesario evaluar la implantación de tecnología ferroviaria u otro tipo de sistemas

completamente segregados, cuando los niveles de demanda son superiores a 40.000 pasajeros/hora/sentido (Hidalgo, 2005a).

A nivel global, para sus primeros años de operación se puede establecer que el sistema Transmilenio ha mejorado significativamente la movilidad de la ciudad de Bogotá, en tanto que ha incrementado la velocidad media del transporte público de 15 km/hora a 26,7 km/hora, lo que en el conjunto del sistema ha significado un ahorro de tiempo de viaje de 136.750 horas por día (para la fase 1 de Transmilenio), con base en lo cual se estima una reducción del tiempo de viaje de un 32% para los usuarios del transporte público. Esto corresponde a un ahorro medio de tiempo de viaje de cerca de 16 minutos por viaje para usuarios de transporte público y de 13 minutos por viaje para el conjunto de la ciudad. Los principales beneficiados de tales de reducciones de tiempo de viaje han sido los habitantes de zonas de bajos ingresos localizadas en la periferia de la ciudad, cuya movilidad obligada (trabajo-residencia) presenta largos trayectos de viaje. (FTA, 2006).

También ha sido exitoso potenciando el cambio modal, reduciendo la proporción de viajes en vehículo privado desde el 18% al 11%. Efectos positivos en cuanto a reducción de contaminación ambiental en determinadas zonas de la ciudad también han sido identificados (FTA, 2006).

En lo que respecta a la estructura empresarial, el sistema Transmilenio es gestionado por la firma Transmilenio S.A., una nueva agencia del sector público responsable de la planeación del sistema y la supervisión diaria del servicio. Contratistas privados son los encargados de la operación del sistema (incluido el costo de los vehículos) y la recolección del recaudo por venta de tiquetes, a través de un acuerdo y contratos de concesión. Dichos contratistas, denominados empresas operadoras, son remunerados en función de los kilómetros de servicio del cual son responsables.

En lo que respecta al aspecto económico, Hidalgo D. (2006) en un análisis de los costos totales (de capital y de operación) de diferentes sistemas de transporte masivo en un periodo de 20 años, para un hipotético corredor de 20 km con unos 35.000 pasajeros/hora/sentido, establece que a pesar de que la opción de un sistema BRT implica unos mayores costos de operación frente opciones ferroviarias ligeras (Light Rail Transit) y pesadas (Heavy Rail Transit), los altos costos de capital (infraestructuras y vehículos) de estos dos últimos, hacen que en conjunto, la opción del sistema BRT sea la más barata.

No obstante, la aplicación de los resultados de este análisis a casos del mundo desarrollado, no es tan claro, en tanto que los costos laborales en países en desarrollo son significativos en el conjunto de los costos de operación (regularmente representan menos del 20%) mientras que estos son mucho más significativos en países desarrollados (entre el 30% y el 75% de los costos de operación). Así, un sistema LRT con vehículos de alta capacidad requiere de menos operadores (conductores) para transportar el mismo número de

pasajeros, lo cual representa una ventaja, razón por la cual, a menudo, estos sistemas tienen son preferidos por encima de los BRT en entornos de países desarrollados (Wright, 2004).

La ciudad de Bogotá tenía la ambición de construir una red de unos 388 km de carril bus para el año 2016. Dicha extensión del plan ha sufrido varias modificaciones por algunos de los gobiernos locales. La ejecución de su fase 3 todavía está en curso y presenta significativos retrasos con respecto al cronograma establecido. Dicho retraso en ejecución ha generado dificultades para atender la alta demanda de viajes.

### ***2.7.2 Beneficios y desventajas de su implementación***

Para el caso del carril bus central, el mayor beneficio es la significativa reducción del tiempo de viaje tanto por su desplazamiento segregado por el corredor como por la reducción de demoras asociadas a las intersecciones, este es un aspecto que aporta gran fiabilidad al servicio.

Esto resulta una ventaja comparativa frente al carril bus estándar debido a que este último se ve perjudicado por demoras asociadas a los vehículos que realizan giros a la derecha, en especial cuando estos además se encuentran sujetos a ceder el paso a los peatones que cruzan la calle a la que intentan ingresar.

En muchas ocasiones este tipo de actuación trae asociada una importante operación de mejora del espacio urbano, al igual que una potenciación del mercado inmobiliario en la zona de dicha infraestructura que en ocasiones redonda en una importante transformación urbanística del sector.

A partir del análisis del estado del arte se puede establecer la gran necesidad de aportar soluciones a los problemas relacionados con el insostenible actual modelo de movilidad.

Las determinantes económicas, sociales y físicas de dicho conflicto, nos plantean un reto de gran alcance al tener que desarrollar propuestas de intervención en pro de una movilidad más sostenible, acordes a una realidad actual.

Determinantes económicas relacionadas con la injerencia que a nivel mundial ejercen la industria energética de combustibles fósiles y sus derivados, y la industria automovilística entre otras. Determinantes sociales relacionadas con la valoración cultural del coche privado como símbolo de estatus social lo que incide significativamente en el uso generalizado de dicho modo de transporte. Determinantes físicas relacionadas con las grandes dimensiones alcanzadas por las ciudades que hacen impensable su funcionamiento en la actualidad sin la participación del transporte motorizado. Todas estas hacen parte del abanico de dificultades a superar.

Diversas estrategias de Gestión de la Movilidad han sido desarrolladas, pero el número de actuaciones a nivel mundial todavía resulta bastante incipiente, dado en gran parte, unas veces a la reticencia al cambio por parte de los ciudadanos, y otras, a la reticencia de las administraciones locales ante su potencial costo político (electoral).

No obstante, en la actualidad cada vez más las administraciones locales ven con mejores ojos estas actuaciones cuyo coste político tiende a reducirse, dado que progresivamente se va pasando de una actitud negativa por parte de los ciudadanos frente a las actuaciones de regulación y restricción del uso generalizado del vehículo privado, a una visión más receptiva frente a lo que ello implica en la mejora del entorno urbano y de su habitabilidad.

Desde la óptica de la teoría económica se ha defendido extensamente el uso de los precios como el mecanismo que garantiza un uso eficiente de la infraestructura. En las últimas décadas, se ha desarrollado y afianzado la teoría de las tarifas de congestión, a partir de considerar que el equilibrio entre oferta y demanda de tráfico no es óptimo porque los usuarios del automóvil no perciben ni internalizan todos los costes que generan.

En este sentido, la introducción de una tarifa de congestión (peaje urbano electrónico) ha permitido que el usuario del vehículo privado perciba la totalidad de sus costes marginales sociales, de manera tal que de un tráfico de equilibrio determinado por los costes medios (costes privados) se pasa un tráfico óptimo determinado por los costes marginales (costes sociales), nivel de tráfico este que en el análisis es señalado como el óptimo desde una perspectiva de eficiencia económica.

La tarificación por el uso de la infraestructura viaria (road pricing), aparece como uno de los mejores instrumentos para que los conductores internalicen los costes externos por congestión y por daño a infraestructuras viarias. No parece en cambio, que resulte tan eficiente (aunque su aporte no es despreciable) para internalizar las externalidades medioambientales en las cuales, en ocasiones, resulta mejor utilizar otros instrumentos como puede ser una tasa directa sobre los combustibles, o una tasa por emisiones.

No obstante, los esquemas de road pricing (electrónicos) presentan costes de implantación altos y sus costes de mantenimientos en sistemas urbanos ronda el 10% del recaudo, sus beneficios sociales son tan importantes que hacen necesaria la inversión. Se debería considerar, por tanto, que para este tipo de instrumentos (esquemas de road pricing con el objetivo de reducción de la congestión en entornos urbanos) un avance importante sería no evaluarlos solamente desde un análisis de coste-eficiencia, sino entenderlos como actuaciones prioritarias del sector público para favorecer, con la promoción del transporte público, un mayor bienestar social. De la misma manera que se establecen grandes partidas presupuestales para la oferta viaria destinada al vehículo privado (carreteras) sin que ello implique necesariamente un resultado favorable de un análisis de coste-eficiencia.

Por otra parte, las principales ciudades de países desarrollados, las cuales cuentan ya con importantes sistemas de transporte masivo inician ahora la lucha por un uso más





racional del espacio viario urbano existente, el cual históricamente se había delegado mayoritariamente al vehículo privado sin ningún cuestionamiento al respecto.

Así, las formulaciones microeconómicas de la congestión de tráfico, las aportaciones de la economía pública y del bienestar, se han convertido en una base teórica sólida para el desarrollo de instrumentos que permitan corregir fallos de mercado, e internalizar externalidades del transporte. No obstante, su coherencia técnica y suficiente fundamentación teórica, todavía hoy las propuestas de implantación de instrumentos como el road pricing para la reducción de la congestión en entornos urbanos, genera en muchas ocasiones una alta reticencia por parte de los ciudadanos, por tratarse de una penalización monetaria, y de los tomadores de decisiones de las administraciones locales ante el potencial coste político.

A la luz de lo anterior, resulta imperioso hacer énfasis en el desarrollo de instrumentos alternativos de gestión de la movilidad que, bajo el precepto de “el espacio viario urbano como un recurso escaso y valioso”, fomenten un uso más racional y eficiente de la infraestructura viaria urbana, mediante una gestión que fomente una mayor participación del uso de esta al transporte público y los modos de transporte no motorizados, por su aporte a la reducción de la congestión y otras externalidades negativas asociadas a esta.

### 3 METODOLOGÍA

En este apartado se presentan los diversos aspectos involucrados en la formulación conceptual y metodológica y la aplicación a un caso práctico del instrumento alternativo de gestión de la movilidad denominado “*Road Space Retribution Charge by Congestion Costs -SRC-*”.

La formulación teórica del problema de investigación se aborda desde la teoría microeconómica de las curvas de oferta y demanda. En general, los modelos de oferta y demanda, consideran de modo global que la red (o cada arco) se comportan según una curva de demanda y una de oferta en horas punta, y haciendo ciertas hipótesis acerca de la infraestructura y los usuarios se calculan los efectos de implementar medidas de regulación. El análisis que se realiza con estos modelos es generalmente estático, ya que cada punto de la curva representa un valor medio de todo el conjunto de viajeros. Este tipo de modelo es utilizado aquí para explorar las posibilidades de una estrategia alternativa de gestión de la congestión de tráfico.

Basado en lo anterior se aborda la formulación matemática del problema de investigación al igual que el desarrollo de la estructura matemática que permite encontrar soluciones óptimas. En este apartado se utiliza una maximización del bienestar social, base de la teoría clásica de la tarifa óptima, y se establece una función de demanda la cual se plantea como una probabilidad de que la diferencia de costes de tiempo y funcionamiento entre el uso de un embotellamiento y otras alternativas, sea menor que el tiempo de viaje en congestión y la tarifa de peaje aplicada.

Con base en lo anterior, se identifican diversas alternativas de aplicación práctica del instrumento de regulación en el contexto de entornos urbanos. Posteriormente, se realiza un ejemplo aplicado al caso sencillo de dos rutas (un corredor congestionado), usando primero un enfoque analítico y luego un enfoque de simulación.

Finalmente, se realiza una aplicación práctica para una red urbana. Con base en una propuesta de Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV para el caso del Centro Histórico de la ciudad de Santiago de Cali (Colombia), se evalúa el potencial impacto que esta, de manera aislada o como parte de una estrategia mixta (medidas físicas, regulatorias y tarifarias), puede tener en el comportamiento de viajes y la eficiencia operativa y ambiental de la movilidad.

#### 3.1 La teoría microeconómica de la congestión

##### 3.1.1 *El fenómeno de la congestión desde la teoría microeconómica*

Para la aproximación a la teoría microeconómica de la congestión se usará como principal referencia a Jara-Díaz (2000), por ello se usará su notación original, en la cual al flujo lo denota como “*Y*”, al automóvil “*A*”, al transporte público “*TP*”, a los costos medios “*CMe*” y los costos marginales “*CMg*”.

Si el número de autos por unidad de tiempo en un arco dado es relativamente bajo, el tiempo de viaje en dicha ruta dependerá solo de la voluntad de cada usuario, puesto que la interacción o fricción entre vehículos es baja, lo cual se conoce como estado de flujo libre.

Al aumentar el flujo de tránsito que entra a la ruta, se llegará a un punto en que la circulación deja de ser tan libre y comienza el fenómeno de interferencia entre automóviles que provoca un aumento en el tiempo de viaje, y dicho grado de interacción entre vehículos aumenta con el flujo, lo que provoca el continuo crecimiento del tiempo de viaje.

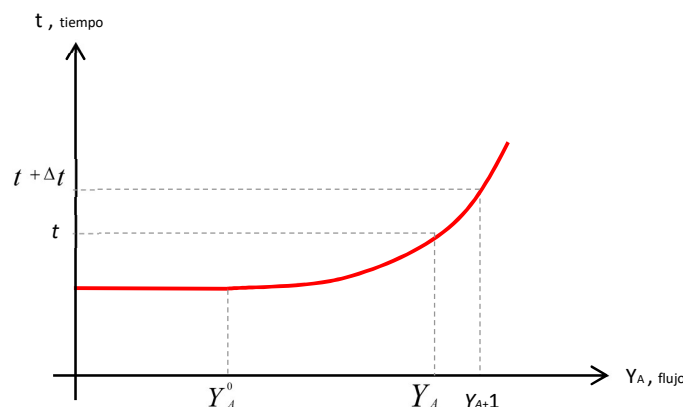
Lo que se ha descrito anteriormente puede ser representado en un diagrama que refleja la asociación entre el tiempo de viaje en la ruta y el flujo de automóviles que la utiliza (ver Figura 19). En términos técnicos, se habla de congestión cuando el tiempo de viaje crece con el flujo, lo que sucede para flujos mayores a  $Y_A^0$ .

Esta visión simplificada del fenómeno de circulación tiene una interesante contrapartida económica. Basta considerar que el tiempo de los viajeros es un recurso aportado por cada uno de ellos al proceso del transporte (viaje).

Así, obviando los costes de operación del vehículo solo por simplificar la descripción, el diagrama de la Figura 19 puede entenderse como una asociación entre el valor de los recursos que aporta cada individuo por circular, es decir, el costo medio (su propio tiempo de viaje), y el flujo circulante. Esto puede expresarse en unidades monetarias multiplicando el tiempo de viaje por un valor subjetivo del tiempo de los usuarios (que supondremos homogéneos), que es un monto calculable con las herramientas de modelación hoy disponibles.

De esta manera se convierte un diagrama tiempo/flujo en uno equivalente al de costo medio/producción de la teoría microeconómica, y al realizar esta interpretación, el fenómeno físico de la congestión adquiere connotaciones distintas.

Figura 19. Congestión vehicular (transporte privado)



Fuente: Jara-Díaz (2000)

En la zona de congestión cada usuario percibe su propio tiempo de viaje pero no las demoras adicionales que induce sobre el resto de los usuarios del sistema. Gráficamente (Figura 19), el aumento de  $Y_A$  en un vehículo provoca un aumento del tiempo de viaje en  $\Delta t$  para un total de  $Y_A$  vehículos; luego el tiempo total de viaje  $Y_A \cdot t$  crece en  $\Delta t \cdot Y_A$  más  $t + \Delta t$ , pero el nuevo usuario solo percibe esto último  $t + \Delta t$ , que es su propio tiempo de viaje.

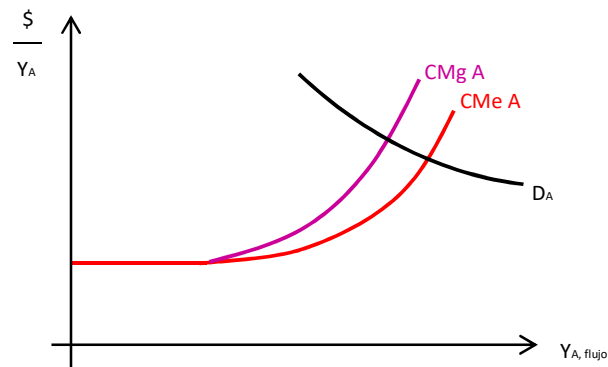
En términos económicos, el tiempo total de viaje representa un costo  $C$  dado por el flujo, el tiempo total y el valor subjetivo del tiempo, así:

$$C = Y_A \cdot t(Y_A) \cdot VS_t$$

El costo marginal  $m$  es la variación del costo al aumentar el producto en un vehículo más por unidad de tiempo.

$$m = \frac{\partial C}{\partial Y_A} = \left[ Y_A \cdot \frac{\partial t}{\partial Y_A} + t \right] \cdot VS_t$$

Figura 20. Coste medio y coste marginal en transporte privado



Fuente: Jara-Díaz (2000)

### 3.1.2 La economía de escala en el transporte público.

El fenómeno de adaptación del número de vehículos al aumento del número de usuarios en transporte público, es de naturaleza distinta al del automóvil -el cual como ya se ha visto muestra costos medios crecientes-, puesto que se está hablando de vehículos cuya forma de operación tiene variables que pueden ser manejadas (u optimizadas en el caso del transporte programado), por los operadores, como frecuencia y tamaños de embarque (tasas de ocupación).

Desde el punto de vista de la optimalidad económica global, operadores y usuarios aportan recursos que, aunque sean distintos, deben ser considerados en conjunto a pesar de que puedan ser analizados por separado. Si bien el recurso tiempo es el fundamental aporte de los usuarios, en el caso del

transporte público hay tres componentes: el tiempo de viaje en el vehículo (al igual que en el caso del automóvil), el tiempo de acceso al sistema, y el tiempo de espera; un análisis de costos totales debe considerar los tres.

El concepto de transporte público programado se refiere a aquel en que el conjunto de mercados es servido con frecuencias fijas y conocidas en rutas establecidas (por lo tanto, no caben dentro de esta categoría los servicios competitivos entre sí). Naturalmente un servicio programado puede o no ser óptimo desde el punto de vista de la asignación de recursos, pero para efectos del modelo aquí presentado nos referiremos a un sistema programado y optimizado.

El estudio de costos que es relevante para la definición de políticas en transporte público, debe involucrar tanto los costes de los operadores como los costes de los usuarios. Los costes de los operadores reflejan gastos relacionados con aspectos de las vías, vehículos y terminales, combustible, etc; y los costes de los usuarios se representan de manera sintética en el tiempo (en el vehículo, de acceso al sistema, y de espera) que ellos deben aportar en la realización del viaje.

Ruta y flota, son dos elementos que sirven para definir las condiciones físicas y económicas de costo, en la operación de transporte público. Por lo anterior, las variables básicas relacionadas con estos dos elementos (ruta y flota), son desde el punto de vista de costos, las que inciden de forma importante en los costos de cualquiera de los dos (operadores o usuarios), o en ambos. Así, lo relevante de una ruta es su longitud, su localización relativa a otras rutas (espaciamiento), y el número de paraderos, en tanto que lo relevante de la flota, son el número de vehículos (que opera principalmente a través de la frecuencia), y el tamaño o capacidad de cada uno de ellos.

En el caso de autobuses, son factores institucionales los que actúan para definir recorridos relativamente estables. Aunque aspectos de las rutas como longitud, localización relativa a otras, y número de paradas, sean aspectos de fácil manejo físico; el aspecto frecuencia referido a la flota, es una variable de gran potencial como herramienta operativa de sencilla adaptación, en tanto que el tamaño o capacidad de los vehículos tiene alternativas tan discretas que estimulan decisiones muy espaciadas en el tiempo, y de difícil reversibilidad. La flexibilidad de los elementos de ruta y flota es inversa al tamaño (y valor) del medio de transporte: metro, tranvía, autobús, taxi. Un ejemplo de ello, es que, para el caso de ferrocarriles urbanos, frecuencia y tamaño (tamaño referido al largo del tren) se convierten en las variables de operación más inmediatas, ante la menor flexibilidad de este medio de transporte, determinada fundamentalmente por razones físicas difíciles de variar ante cambios mensuales o incluso anuales de la demanda.

Considerando los recursos aportados por los operadores, podemos decir que hay costos de operación y costos de capital. Los primeros incluyen costos de

servicio, mantenimiento y administración, en tanto que los segundos están asociados a infraestructura y equipo rodante. Un análisis detallado de la variación de estos costos con la demanda en estructura de ruta conocida, genera curvas de costo medio decreciente en todo el rango relevante salvo para el autobús, el cual exhibe costos medios constantes para el operador, a partir de una cantidad relativamente baja de pasajeros. Tranvías y ferrocarril urbano (elevado y subterráneo) difieren en los niveles de costo medio, pero no en su forma, la que es posible explicar brevemente por el mayor costo de inversión en equipos y vías, y el menor costo de operación a partir de volúmenes significativos de pasajeros.

En cuanto al valor de los recursos aportados por los usuarios, los costos están asociados a los tiempos de viaje (en el vehículo, de espera, y de acceso al sistema) y a las respectivas valoraciones o precios sociales, los que en primera aproximación pueden considerarse independientes del volumen de viajeros. Cada componente tiene clara relación con los diversos elementos de ruta y flota.

Así, el tiempo medio de viaje en el vehículo no aumentará por interacción entre vehículos en aquellos casos en que la congestión no puede estar presente debido a la existencia de rutas fijas y segregadas (corredores de buses), aunque debe considerarse que existirá una frecuencia máxima factible. Sin embargo, no solo la congestión vehicular provoca tiempos medios crecientes de viaje; la subida de pasajeros a un vehículo también provoca demoras adicionales a quienes han subido antes.

Como ya se dijera, la adaptación (aumento) de frecuencia es el mínimo ajuste al uso de insumos ante aumentos en la demanda si se trata de vehículos de capacidad conocida y fija. Por este motivo, el tiempo medio de espera disminuye con el flujo. Por último, en los casos en que el diseño de rutas es adaptable, el aumento relativamente homogéneo de la demanda en el espacio urbano provocaría una densificación de las rutas de transporte público, induciendo una disminución de los tiempos de acceso a los paraderos.

En síntesis, respecto a las tres componentes de tiempo que constituyen el aporte de recursos de cada usuario (costo medio), el tiempo en el vehículo tiende a ser creciente por congestión vehicular y subida de pasajeros, el tiempo de espera disminuye siempre con el aumento del volumen de usuarios, y el tiempo de acceso al sistema disminuye si hay posibilidad de rediseños de ruta (mediante densificación de rutas, que induce una disminución de los tiempos de acceso a los paraderos). De este análisis cualitativo, cuyo resultado pareciera depender del modo de transporte específico de transporte público que se analice, resulta en realidad un esquema que es común a todos los modos de transporte contemplados en el transporte público.

En efecto, el más flexible de los modos masivos (el autobús), es el que presenta mayor probabilidad de congestión o aumento del tiempo de viaje por interacción vehicular a partir de ciertos volúmenes, pero también es el que puede responder

con más facilidad a la densificación de rutas por aumentos de demanda, provocando menores tiempos de acceso y egreso del sistema.

Por otra parte, los modos con estructura de ruta menos flexible como lo es el tranvía, o con estructura de ruta inflexible como lo es el metro, tienen efectos pequeños (para el tranvía) o nulos (para el metro) sobre la congestión vehicular en la ciudad. Es decir, en el caso del autobús las variaciones en los tiempos de viaje y acceso ante aumentos en la demanda tienen distinto signo, y en el caso del tranvía y el metro son pequeñas o nulas. Luego es el efecto de espera media, el que prevalece, generando una curva de costos medios de usuarios decrecientes con el flujo en todos los casos.

La conclusión a partir de este análisis cualitativo, es que la suma de costos de los operadores más costos de los usuarios arrojaría un costo total que aumenta menos que proporcionalmente con el número de pasajeros si el sistema opera en forma adecuada.

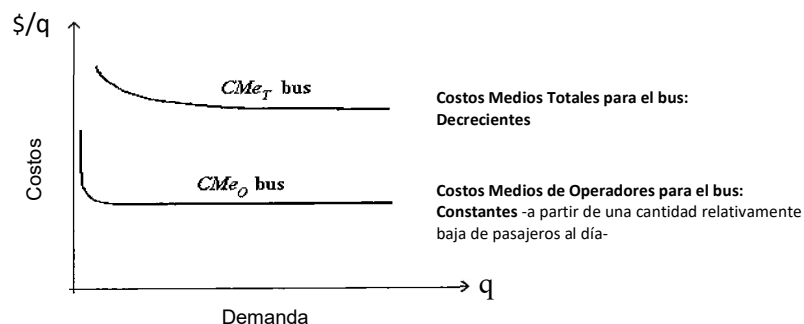
Esto se ilustra en la Figura 21, estimaciones de Allport (1981) para el caso del autobús, en la cual se muestran los costes medios para los operadores y los costes medios totales.

Dado que la existencia de costos medios decrecientes implica costos marginales menores que los medios, el esquema resultante para el transporte público sería exactamente el opuesto al caso del automóvil.

Finalmente, a manera de síntesis, en el caso del transporte público programado (es decir, aquél cuyas variables de operación han sido optimizadas de acuerdo a la demanda), los costos medios son decrecientes tanto para los operadores como para los usuarios, lo que implica una serie de relaciones relevantes como las siguientes:

- a) Costos medios totales son decrecientes,
- b) Costos marginales de operadores son menores que sus costos medios,
- c) Costos marginales de los usuarios son menores que sus costos medios,
- d) Costos marginales totales son menores que los costos medios.

Figura 21. Costos medios en transporte público



Fuente: Allport (1981)

### **3.1.3 Equilibrio de reparto modal y regulación externa**

Partiendo de lo planteado anteriormente podemos considerar tres aspectos:

- El total de viajes en zonas urbanas no es muy sensible a variables de operación del sistema de transporte, ya que ellas inciden en cómo se viaja pero no en cuánto se viaja.
- Para un sistema de transporte dado en calidad y capacidad de su red, el aumento de viajes en automóvil se traduce en un aumento de las demoras por fenómeno de congestión, dando como resultado unos costos medios crecientes.
- En las mismas condiciones, el aumento de viajes en transporte público programado provoca un aumento de las frecuencias de servicio, y de la densidad de las rutas –cuando ello es posible–, lo que causa disminución de los tiempos de espera y acceso, y un potencial aumento de los tiempos de viaje dado que la subida de pasajeros a un vehículo también provoca demoras adicionales a quienes han subido antes (Sin embargo, el análisis de costo de los usuarios se basa en que la disminución de los tiempos de espera y de acceso a medida que el volumen de usuarios crece, pesa más que el aumento de los tiempos de viaje en el vehículo). El resultado muestra costos medios decrecientes para el transporte público, como se veía en la Figura 21 para el caso del autobús.

La combinación de estos tres elementos permite una interpretación del equilibrio del sistema de transporte urbano. Si planteamos, en primer lugar, que el total de viajes en un área urbana es  $Y$ , el cual corresponde a la sumatoria de los viajes en transporte privado  $Y_A$  y en transporte público  $Y_{TP}$ , y por tanto es independiente de la elección modal; y en segundo lugar, que en el transporte público se trata de servicios segregados y programados, es posible representar en un mismo gráfico todos estos elementos. (ver Figura 22).

Así, en la Figura 22,  $Y$  es demanda total,  $C_{MeA}$  costos medios del automóvil y  $C_{MeTP}$  costos medios del transporte público. Los dos últimos en función de su propia demanda (nótese que el flujo de usuarios del transporte público se mide hacia la derecha, y el de automóviles hacia la izquierda).

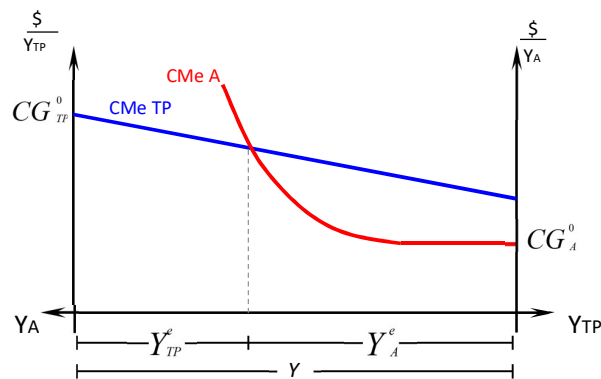
En esta representación hay varias condiciones implícitas que es útil destacar. En primer lugar, el costo generalizado de los usuarios de autos en condiciones de flujo libre, es menor que el del transporte público, reflejando sus evidentes ventajas en niveles bajos de flujo. En segundo lugar, el servicio de los  $Y$  viajes solo con auto es simplemente no factible. Obviamente, las formas de cada curva reflejan las economías de escala en el transporte público programado y las deseconomías de escala del transporte privado para una red urbana de calidad y capacidad dadas.



En este esquema, el reparto modal es determinable de manera sencilla, puesto que se trata de igualar los costes generalizados para ambos modos. La explicación radica en que cualquier otro punto distinto de  $Y_{TP}^e$ ,  $Y_A^e$ , implicará costos generalizados mayores en un modo de transporte con respecto a otro, lo que implica un cambio modal hacia el equilibrio.

En efecto, en un punto a la izquierda de la intersección, los usuarios de auto perciben un costo mayor y tienden a disminuir, y en un punto a la derecha son los usuarios del transporte público los que al percibir un costo mayor se cambiarán al automóvil. (Nótese que hasta aquí se supone que opera el coste medio).

Figura 22. Equilibrio de reparto modal (sin medida de regulación externa)



Fuente: Jara-Díaz (2000)

Si bien, por una parte, la congestión vehicular en la ciudad durante las horas punta es inevitable, y por otra un cierto nivel de congestión resulta eficiente; la cuestión es entonces, establecer si la congestión está en un nivel óptimo, y de no estarlo, será conveniente hacer uso de alguna herramienta para hacer que esta decrezca hasta un nivel óptimo.

Para realizar un análisis de ello, se plantea el gráfico de la Figura 23 en la cual, el eje horizontal  $Q$  mide el volumen de tráfico, el eje vertical  $C$  mide el costo del viaje (que es la suma del costo monetario y el costo en tiempo), y aparecen también, una curva de demanda o beneficio marginal, una curva de costes medios denotada esta vez como coste privado del viaje, y una curva de costos marginales denotada como costo social del viaje.

La curva de demanda o de beneficio marginal, muestra para cada costo de viaje, cuantos viajeros usarían la vía, de manera tal, que a medida que el coste descendiera –en un caso hipotético–, aumentaría el número de usuarios dispuestos a hacer uso de la vía. Esto es porque al descender el costo, hay mucha más gente para la cual su beneficio marginal excede al costo del viaje, y

está claro que los conductores usan la vía siempre y cuando su beneficio marginal (mostrado por la curva de demanda) exceda el costo privado del viaje.

El conductor marginal (el último que ingresa al sistema) hace más lento el tráfico incrementando el tiempo de viaje, forzando así, a que otros conductores gasten mucho más tiempo en la vía para realizar su viaje, por lo que la externalidad de la congestión aumenta con el flujo de tráfico. Así, el costo externo del viaje, es igual al valor monetario de la externalidad de la congestión.

El coste privado del viaje es el coste de viaje del individuo, definido como la suma del coste monetario y el coste de tiempo (calculable como tiempo de viaje multiplicado por el coste de oportunidad) de dicho individuo. El coste social del viaje es la suma del coste privado del viaje y el costo externo del viaje. En la Figura 23 se muestra la curva de coste social del viaje, por encima de la curva de coste privado del viaje, donde la distancia entre estas dos para un  $q$  dado, corresponde al coste externo del viaje.

Ahora, partiendo de que el conductor usa la vía siempre que el beneficio marginal del viaje (mostrado en la curva de demanda) exceda el costo privado del viaje, vemos que en el punto de equilibrio B donde se interceptan las curvas de beneficio marginal y coste privado, por ser el punto en el que se igualan beneficio marginal y coste privado, se convierte en el umbral límite hasta el cual un conductor está dispuesto a usar la vía. Es decir, que a partir de este flujo de tráfico (indicado sobre el eje horizontal Q) correspondiente al punto B, un conductor adicional vería que su beneficio marginal es menor que el coste privado de su viaje (tramo de la curva de demanda por debajo del punto B).

Pero el anterior –el punto B–, no es más que un punto de equilibrio de número de conductores, con lo cual, para hacer un uso más eficiente de la vía, hay que plantearse ahora un punto óptimo de número de conductores.

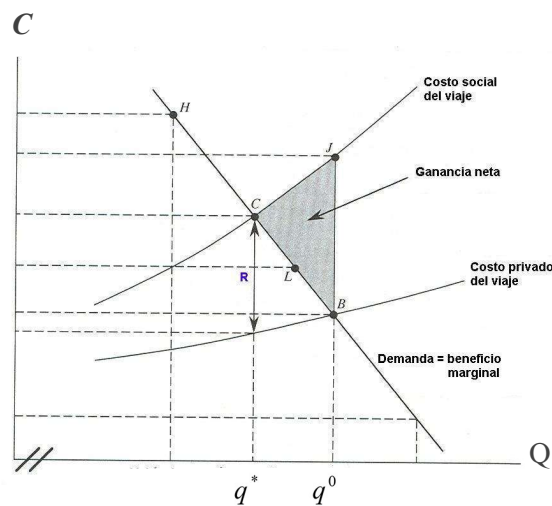
La regla básica de eficiencia es que una actividad debe incrementarse mientras el beneficio marginal exceda el coste marginal (o coste social del viaje en este caso), así que el punto límite estará en el nivel óptimo en el cual, el beneficio marginal iguala al coste marginal. En la Figura 23, el beneficio marginal es mostrado por la curva de demanda y el costo marginal es mostrado por la curva de costo social del viaje, partiendo de lo cual, vemos que la curva de demanda intercepta a la curva de costo social en el punto C, el cual, si lo proyectamos sobre el eje horizontal Q, nos indica el flujo de tráfico óptimo, hasta el cual se hace un uso eficiente de la vía.

En síntesis, se observa que en los puntos contenidos en el tramo de la curva de demanda hasta el punto de intersección C (como es el caso del punto H), se hace un uso eficiente de la vía. En los puntos contenidos en el tramo de la curva de demanda comprendido entre el punto de intersección C y el punto de intersección B, se hace un uso ineficiente de la vía dado que los usuarios ignoran el coste externo de su viaje (tal como sucede en el punto L). En los puntos

contenidos en el tramo de la curva de demanda que está por debajo del punto de intersección B, los conductores preferirán no hacer uso de la vía.

Dado que el crecimiento del volumen de tráfico se presenta siempre que el beneficio marginal del usuario exceda el coste privado del viaje, dicho volumen puede crecer progresivamente hasta  $q^0$  (abcisa del punto B de la curva de demanda) haciendo un uso ineficiente de la vía; resulta interesante ver que al introducir una medida de regulación externa  $-R-$ , que haga que el usuario asuma los costos sociales de su viaje, se puede producir una disminución del volumen de tráfico desde  $q^0$  hasta  $q^*$ , de manera tal, que se produce una ganancia social neta (área sombreada), que representa a los costes que ahorraría la sociedad por pasar de consumir recursos según la ordenada del punto J a la ordenada del punto C.

Figura 23. Congestión: Equilibrio versus flujo óptimo de tráfico

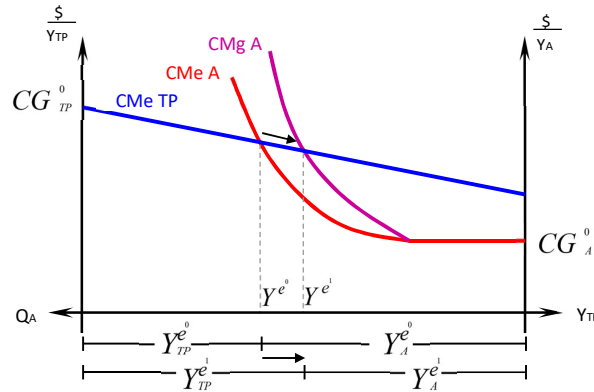


Fuente: O'Sullivan (1993)

Ahora desde el punto de vista de la optimalidad económica global (ver Figura 24), interesa ver que al trabajar con la curva de costes marginales del automóvil, el equilibrio de reparto modal pasa de  $Y^{e0}$  a  $Y^{e1}$ , con cuatro efectos visibles:

- Aumento de los usuarios del transporte público.
- Disminución del transporte privado.
- Disminución de los tiempos de viaje en ambos modos.
- Una disminución del coste generalizado del sistema.

Figura 24. Equilibrio de reparto modal desde la optimalidad económica global



Fuente: Jara-Díaz (2000)

Un primer tipo de políticas que puede analizarse, es el relacionado con los resultados operativos de la inversión en infraestructura viaria de transporte: aumento de la oferta.

En este caso, lo que corresponde es analizar desplazamientos de las curvas ante una intervención que, en términos operativos, significa cambiar (mejorar) la relación flujo-costo medio en alguno de los modos.

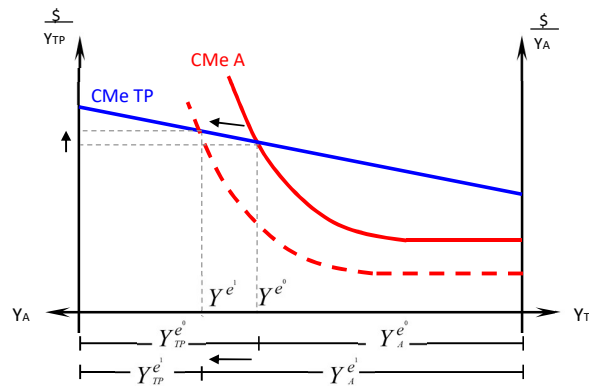
En la perspectiva del esquema planteado en la Figura 25, una inversión en vialidad urbana consiste en un aumento de calidad y/o capacidad de las vías, se traduce en un desplazamiento de la curva de costo medio de los automovilistas hacia la izquierda y hacia abajo.

Tal medida tiene sentido desde el punto de vista de los usuarios de automóvil, puesto que para cada nivel de flujo el costo medio (tiempo de viaje) se reduce.

Sin embargo, tal como se muestra en la Figura 25, el punto de equilibrio se desplaza a la izquierda del punto inicial, aumentando el número de usuarios de auto y disminuyendo el número de usuarios del transporte público. Debido al costo medio total decreciente de este último sistema, el costo generalizado crece para todos los usuarios pese a las aparentes ventajas de la inversión.

Este fenómeno conocido como la paradoja de Mogridge (aunque él la denominaba Downs-Thomson), tiene su explicación evidente en la diferencia entre un análisis parcial y un análisis global de sistema.

Figura 25. Efecto de un mejoramiento en la red vial



Fuente: Jara-Díaz (2000)

Un segundo tipo de políticas son aquellas relacionadas con los sistemas tarifarios al vehículo privado en medio urbano, en especial aquellos que tarifican la congestión de tráfico en medio urbano.

Las tarifas por congestión tienen sus fundamentos teóricos en la necesidad de optimizar el uso de la infraestructura y los modos de transporte por carretera, considerando los costos sociales que estos generan. Si se lograra que los usuarios pagaran los costes que causan a terceros por consumir un espacio (el urbano, por ejemplo) o por viajar a determinadas horas de mayor demanda, se tendría un sistema fiscal del transporte urbano y de carretera más adaptado a sus costes reales, desde el punto de vista microeconómico.

Dada la existencia de costos medios crecientes a partir de ciertos volúmenes vehiculares, el real costo (costo marginal) generado por un automóvil adicional en el flujo, es superior al costo medio, y la diferencia entre costo marginal y costo medio es precisamente lo que debe cobrarse para inducir un uso óptimo del espacio vial disponible.

En efecto, en la zona de congestión cada usuario percibe su propio tiempo de viaje, pero no las demoras adicionales que induce sobre el resto de los usuarios del sistema. Como se observó en la Figura 19, el aumento de  $Y_A$  en un vehículo provoca un aumento del tiempo de viaje en  $\Delta t$  para un total de  $Y_A$  vehículos; luego el tiempo total de viaje  $Y_A \cdot t$  crece en  $\Delta t \cdot Y_A$  más  $t + \Delta t$ , pero el nuevo usuario solo percibe esto último  $t + \Delta t$ , que es su propio tiempo de viaje. En términos económicos, el tiempo total de viaje representa un costo  $C$  dado por:

$$C = Y_A \cdot t + (Y_A) \cdot \Delta t$$

El costo marginal  $m$  es la variación del costo al aumentar el producto en un vehículo más por unidad de tiempo.

$$m = \frac{\partial C}{\partial Y_A} = \left[ Y_A \cdot \frac{\partial t}{\partial Y_A} + t \right] \cdot VS_t$$

Dado que el costo medio (lo que es pagado por cada usuario) es solo tiempo por valor subjetivo del tiempo ( $t \cdot VS_t$ ), y que la tarifa óptima económica determinada a partir de los costos marginales tiene un valor más alto, entonces el usuario lo que debe cubrir es la diferencia entre estos dos costes, diferencia esta que corresponde a lo que sería la tarifa por congestión  $P^*$ .

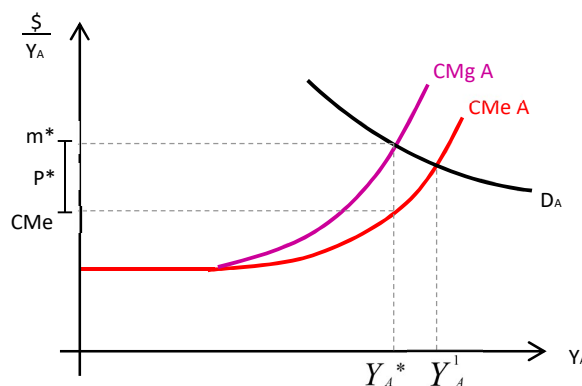
$$P^* = m - t \cdot VS_t = Y_A \cdot \frac{\partial t}{\partial Y_A} \cdot VS_t$$

En síntesis, un fenómeno físico cual es el de interacción entre vehículos, ha sido interpretado como un fenómeno económico que da origen a un pago que se hace cargo de la diferencia entre el costo marginal y el costo medio, internalizando así, una externalidad.

Transformando la Figura 19 a dinero, y añadiendo una curva de demanda, podemos ver en la Figura 26, que si no se cobra por congestión, el flujo de equilibrio es  $Y_A^1$ , (proyección sobre el eje horizontal del punto de intersección entre la curva de costes medios y la curva de demanda), y que indica que el usuario del automóvil “paga” solo con su propio tiempo.

El óptimo económico, sin embargo, corresponde a una tarifa igual al costo marginal  $m^*$  y al flujo  $Y_A^*$  (menor que  $Y_A^1$ ); y dado que dicho flujo ya paga el equivalente a los costos medios, se debe cargar la diferencia  $m^* - CM_e$ , representada por  $P^*$ , que es la tarifa por congestión.

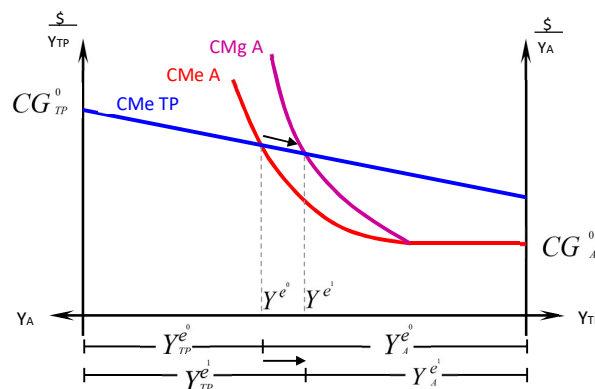
Figura 26. Tarifación por congestión



Fuente: Jara-Díaz (2000)

Desde el punto de vista de la optimalidad económica global, interesa ver que si se introduce tarificación por congestión, el equilibrio pasa de  $Y^{e^0}$  a  $Y^{e^1}$  (ver Figura 27). Reparto modal bajo política de tarificación al vehículo privado), con cuatro efectos visibles: aumento de los usuarios de transporte público, disminución del transporte privado, disminución de los tiempos de viaje en ambos modos, y un cobro por congestión que, sumado al tiempo de los automovilistas, genera un costo generalizado inferior al de  $Y^{e^0}$ .

Figura 27. Reparto modal bajo política de tarificación al vehículo privado



Fuente: Jara-Díaz (2000)

Otras alternativas han sido planteadas para aliviar o luchar contra la congestión, entre las que encontramos el impuesto al combustible, el control de aparcamiento, y la restricción a la propiedad del vehículo entre otros.

Si el objetivo fuera solo aumentar los ingresos para financiar infraestructuras bastaría con elevar los impuestos fijos de los vehículos; si además se quiere reducir el uso general del vehículo y el impacto ambiental, el aumento de los impuestos del combustible puede jugar un papel importante; pero si el objetivo es el de reducir las demoras y mejorar la accesibilidad de ciertas zonas, las alternativas tendrán que ser más sofisticadas.

### 3.2 La teoría clásica de la tarifa óptima.

Un sistema de transporte operando sin ninguna restricción ni regulación externa, no produce el óptimo de la teoría microeconómica.

Haciendo referencia a la Figura 28, se observa que si la curva de costes del usuario (coste privado del viaje) es  $C$ , la curva de demanda  $p$  tiene su punto de equilibrio

en  $E$ , pero este punto no es el óptimo para la sociedad, ya que esta decisión no tiene en cuenta los costes sociales, como lo son los costes de la congestión, la contaminación, el ruido etc. El coste marginal en cambio equivale al coste social del viaje y está representado en el gráfico como la curva  $M$ .

A partir de aquí, podemos observar cómo después del punto  $O$ , cada flujo unitario que se añade ocasiona un aumento de costes para los demás vehículos en la vía (rectángulo sombreado). Por eso, después del punto  $O$ , cada aumento del flujo de un valor  $q_1$  a un valor  $q_2$ , aumenta el coste de todos los usuarios en el sistema.

La curva  $M$  de costes marginales tiene su punto de equilibrio en  $S$ , siendo el segmento  $RS = \tau^*$  la tarifa óptima que debe aplicarse para conseguir el flujo óptimo  $q^*$ .

Así, si BSN es el beneficio social neto (el área comprendida entre la curva de demanda  $p$  y la ordenada del punto  $R$  –del coste para el  $q$  considerado-), se tiene que:

$$B_{SN} = \int_p^{\infty} q dp + (pq - cq) = \int_p^{\infty} q dp + \tau q$$

maximizando el beneficio social neto, se halla la tarifa óptima  $\tau^*$  y la demanda  $q^*$  en el nuevo punto de equilibrio obtenido al aplicar la tarifa.

$$\frac{dB_{SN}}{d\tau} = 0 = -q \frac{dp}{d\tau} + \tau \frac{dq}{d\tau} + q$$

$$\tau^* = q \left[ \frac{dp}{dq} - \frac{d\tau}{dq} \right]$$

$$\tau^* = q \frac{d(p - \tau)}{dq} = q \frac{dc}{dq}$$

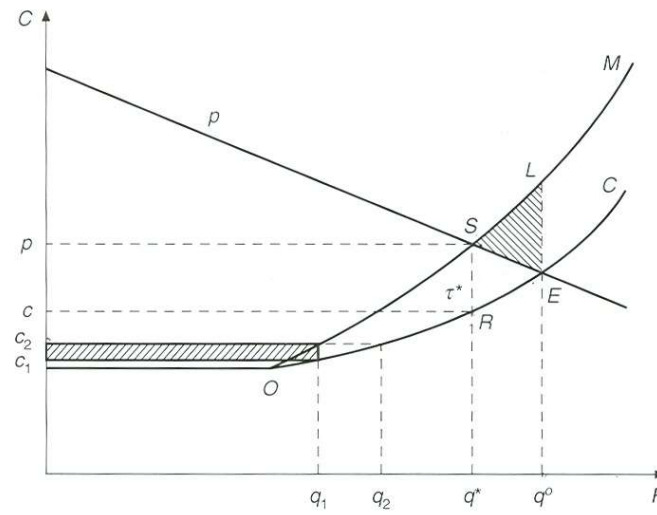
En el óptimo, el flujo de equilibrio es igual a  $q^*$  donde  $c$  son los costes medios de operación en función de  $q$ , y la derivada es evaluada para el nivel de demanda  $q^*$ .

Con la aplicación de la tarifa óptima se obtiene una ganancia igual al área  $SLE$ , la cual representa a los costes que ahorraría la sociedad por pasar de consumir recursos según la ordenada del punto  $L$  a la ordenada del punto  $S$ .

$$\tau^* = q^*(dc/dq)$$



Figura 28. Teoría de la tarifa óptima



Fuente: Robusté y Sarmiento (1999)

### **3.3 La capacidad viaria y el nivel de servicio en entornos urbanos**

#### **3.3.1 Conceptos**

El Manual de Capacidad Viaria, en inglés “*Highway Capacity Manual - HCM*”, (TRB, 2010), en su volumen 1 (Conceptos), el capítulo 4 aborda los conceptos de flujo de tráfico y capacidad y, el capítulo 5, la calidad y los niveles de servicio, los cuales son descritos para cada uno de los cuatro modos de transporte involucrados: automóvil, peatón, bicicleta y transporte público de superficie en la vía.

Dado el enfoque del presente documento de investigación, se hará énfasis en los aspectos relacionados con el modo de transporte automóvil.

#### **3.3.2 Conceptos de flujo de tráfico y capacidades**

La capacidad representa la tasa de flujo horario sostenible máximo a la cual se espera que, de una manera razonable, personas o vehículos atraviesen un punto o una sección uniforme de un carril o vía durante un periodo de tiempo determinado y bajo condiciones prevalentes de la vía, ambiente, tráfico y control. La expectativa razonable es la base para la definición de capacidad. La capacidad establecida por un dado elemento del sistema es una tasa de flujo que puede ser alcanzada de manera repetida para periodos pico de suficiente demanda, lo opuesto a ser la tasa de flujo máximo que alguna vez podría ser observada. Elementos del sistema que tengan diferentes condiciones prevalentes tendrán diferentes capacidades, y la tasa de flujo máximo observado a un determinado elemento de un sistema puede variar de día a día.

#### **3.3.3 Parámetros básicos del flujo de automóviles**

En el caso del modo automóvil, diversas variables básicas pueden ser usadas para describir el flujo de tráfico en una vía. En el HCM, las variables volumen, tasa de flujo y velocidad son parámetros comunes para tanto para infraestructuras con flujos ininterrumpidos como interrumpidos, pero la variable densidad aplica principalmente para flujos ininterrumpidos.

Los parámetros básicos para el flujo del modo automóvil se describen a continuación. Dada la referencia, se usará la nomenclatura y notación original establecida en el “*Highway Capacity Manual – HCM*” (TRB, 2010).

- **Volumen y tasa de flujo**

El volumen y la tasa de flujo son dos medidas que cuantifican el número de vehículos pasando por un punto en un carril o vía durante un determinado intervalo de tiempo. Estos términos son definidos como sigue:

- Volumen: El número total de vehículos que pasan por un punto o sección de un carril o vía durante un determinado intervalo de tiempo; cualquier tipo de intervalo puede ser usado, pero los volúmenes son típicamente expresados en términos de periodos anuales, diarios, horarios o sub-horarios.
- Tasa de flujo: La tasa horaria equivalente a la cual los vehículos pasan por un punto o una sección de un carril o vía durante un determinado intervalo de tiempo menor a 1 hora, usualmente 15 minutos. En adelante, nos enfocaremos en la tasa de flujo y las variaciones en el flujo que pueden ocurrir en el curso de 1 hora.

Volumen y tasas de flujo son variables que ayudan a cuantificar la demanda, que es el número de ocupantes o conductores de vehículos (usualmente expresado como número de vehículos) que desea usar un elemento dado del sistema durante un periodo de tiempo específico, típicamente 1 hora o 15 minutos.

- **Variaciones sub-horarias en el flujo**

Las tasas de flujo típicamente varían durante el curso de 1 hora. Por ello, los análisis del HCM típicamente consideran el flujo de los 15 minutos pico para la hora de análisis. El uso del flujo de los 15 minutos pico ajusta todas las variaciones del flujo durante la hora y, por lo tanto, provee el terreno propicio entre diseñar para volúmenes horarios y diseñar para la tasa de flujo extrema o flujo de los 15 minutos pico.

Dado que los inputs para los procedimientos del HCM son comúnmente expresados en términos de demandas horarias, el HCM usa el Factor de Hora Pico (*Peak Factor Hour, PHF*) para convertir un volumen horario en la tasa de flujo de 15 minutos pico. Aunque es tradicionalmente llamado factor de "hora pico", el PHF es aplicable a cualquier análisis horario, ya sea pico o no pico. El PHF es el ratio entre el volumen horario total y la tasa de flujo pico dentro de la hora.

$$PHF = \frac{\text{Volumen hora}}{\text{Tasa de flujo pico (dentro de la hora)}}$$

Si se usa un periodo de 15 minutos, el PHF puede ser computado como sigue,

$$PHF = \frac{V}{4 \times V_{15}}$$

Donde,

*PHF* = factor hora pico

*V* = volumen hora (veh/h)

*V*<sub>15</sub> = volumen del periodo pico de 15 de la hora de análisis (veh/15 min)

Cuando el PHF es conocido, este se puede convertir un volumen de hora pico en una tasa de flujo pico, como sigue,

$$v = \frac{V}{PHF}$$

Donde *v* es la tasa de flujo para el periodo pico de 15 minutos, expresado en vehículos por hora (las otras variables fueron definidas anteriormente).

La anterior ecuación para estimar *v* no se necesita ser usada si se dispone de conteos de tráfico; sin embargo, el intervalo de conteo elegido debe identificar el periodo de 15 minutos de flujo máximo. Así, la tasa puede ser calculada directamente como 4 veces el conteo de 15 minutos máximo y el PHF tomaría el valor de 1,00.

Bajos valores de PHF significan una mayor variabilidad del flujo, mientras altos valores significan una menor variación del flujo durante la hora. Cuando se usan conteos horarios, el PHF puede estar en un rango entre 1,00, lo cual indica que durante cada periodo de 15 minutos se presenta la misma demanda, y 0,25, lo cual indica que el total de la demanda se presenta durante el periodo pico de 15 minutos.

El PHF en áreas urbanas generalmente está en un rango entre 0,80 y 0,98. Un PHF por encima de 0,95 es a menudo indicador de altos volúmenes de tráfico, algunas veces con restricciones de capacidad en el flujo durante la hora pico. Un PHF por debajo de 0,80 se presenta en localizaciones con demandas caracterizadas por altos picos, como es el caso de escuelas, industrias con cambios de turno y lugares con eventos programados.

- **Velocidad**

Si bien el volumen de tráfico provee un método para cuantificar los valores de capacidad, la velocidad (o su recíproco tasa de tiempo de viaje) es una importante medida de la calidad del servicio de tráfico ofrecido a los automovilistas. Esta define los niveles de servicio (en inglés, *Level of Service, LOS*) para carreteras de 2 carriles y vías urbanas.

La velocidad es definida como una tasa/índice de movimiento expresado como distancia por unidad de tiempo, generalmente en términos de milla por hora o kilómetros por hora.

Diversos parámetros de velocidad pueden ser aplicados al flujo de tráfico, entre las cuales se encuentran la velocidad promedio de viaje, la velocidad

media espacial, la velocidad media de tiempo, la velocidad a flujo libre y la velocidad promedio de recorrido.

- Velocidad promedio de viaje: Una medida del flujo de tráfico con base en el tiempo de viaje observado en una carretera con longitud conocida. Se expresa como la longitud del segmento dividida entre el tiempo de viaje promedio de todos los vehículos que atraviesan el segmento, incluyendo el tiempo de demora asociado a detenciones o paradas de los vehículos.
- Velocidad promedio de recorrido: Una medida del flujo de tráfico con base en el tiempo de viaje observado en una carretera con longitud conocida. Se expresa como la longitud del segmento dividida entre el tiempo de viaje promedio de todos los vehículos que atraviesan el segmento, incluyendo solo el tiempo en el cual los vehículos se encuentran en movimiento.
- Velocidad a flujo libre: La velocidad promedio de vehículos en un segmento dado, medido bajo condiciones de volumen bajo, cuando los conductores son libres de conducir a la velocidad deseada y sin restricciones por la presencia de otros vehículos o equipos de control de tráfico (señales de tráfico, rotondas, señales de pare).

Para la mayoría de los procedimientos del HCM que usan la velocidad como una medida de servicio, la velocidad promedio de viaje es el parámetro de definición.

- **Densidad**

Densidad es el número de vehículos ocupando una determinada longitud de carril o de carretera en un instante en particular. Usualmente es expresada como vehículos por milla o por kilómetro, o como pasajeros de vehículos por milla o por kilómetro.

Medir la densidad directamente en campo presenta una mayor dificultad, dado que requiere de una localización aérea desde la cual se pueda hacer fotografía o video de una significativa longitud de la carretera.

Sin embargo, la densidad puede ser calculada a partir de la velocidad promedio de viaje y la tasa de flujo, las cuales son más fáciles de medir en terreno. La siguientes formula es usada condiciones sin saturación de tráfico.

$$D = \frac{v}{S}$$

Donde,

$v$  = tasa de uso (veh/h)

$S$  = velocidad promedio de viaje (mi/h) (km/h)

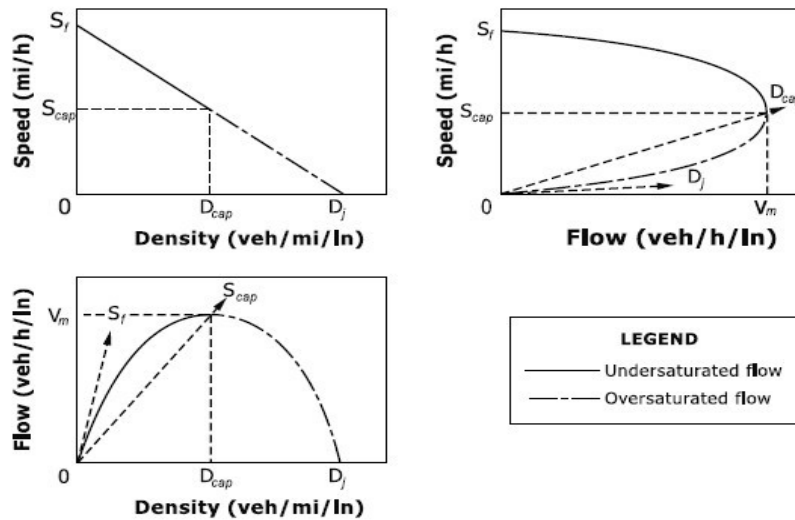
$D$  = densidad (veh/mi) (veh/km)

Densidad es un parámetro crítico para infraestructuras de flujos ininterrumpidos porque este caracteriza la calidad de las operaciones de tráfico. Este describe la proximidad de los vehículos unos a otros y refleja la libertad de maniobrar en el flujo de tráfico.

### 3.3.4 Relación entre parámetros básicos del modo automóvil

La relación generalizada entre los 3 parámetros básicas velocidad, densidad y tasa de flujo para infraestructuras de flujo ininterrumpido se plantea en la siguiente figura.

Figura 29. Relación generalizada entre velocidad, densidad y tasa de flujo en infraestructuras de flujo ininterrumpido.



Source: Adapted from May (3).

Fuente: TRB (2010) Highway Capacity Manual, a partir de May, A.D. (1990)

La forma de estas funciones depende de las condiciones prevalentes del tráfico y la carretera en el segmento bajo estudio y en la longitud del segmento.

Las curvas de la figura ilustran diversos puntos significativos.

El primero, es cuando no hay vehículos en el segmento, la densidad es cero y la tasa de flujo es cero. La velocidad es teórica para esta condición y sería seleccionada por el primer conductor (presumiblemente a un valor alto). Dicha velocidad es representada por  $S_f$  en los diagramas.

El segundo, es cuando la densidad se vuelve tan alta que todos los vehículos deben detenerse, la velocidad y la tasa de flujo son cero porque no hay movimiento y los vehículos no pueden pasar un punto en la carretera. La densidad a la cual todo el movimiento se detiene es llamada densidad de atasco o embotellamiento, denotada con  $D_j$  en los diagramas.

El tercero, se presenta entre estos dos puntos extremos, la dinámica del flujo de tráfico produce un efecto de maximización. En la medida en que el flujo se incrementa desde cero, la densidad también se incrementa porque más vehículos están en la carretera. Cuando esto ocurre, la velocidad disminuye a causa de la interacción de vehículos. Dicha disminución es insignificante en densidades y tasas de flujo bajas y medias. En tanto la densidad se incrementa, las curvas generalizadas sugieren que la velocidad disminuye significativamente antes de que la capacidad sea alcanzada. La capacidad es alcanzada cuando el producto de la densidad y la velocidad da como resultado la máxima tasa de flujo. Esta condición es mostrada como la velocidad en la capacidad  $S_{cap}$  (a menudo llamada velocidad crítica), densidad en la capacidad  $D_{cap}$  (algunas veces llamada densidad crítica), y máximo flujo  $v_m$

La función velocidad – densidad es usada principalmente para trabajos teóricos, las otras dos funciones son usadas en el HCM para definir los niveles de servicio para autopistas y carreteras multicarril.

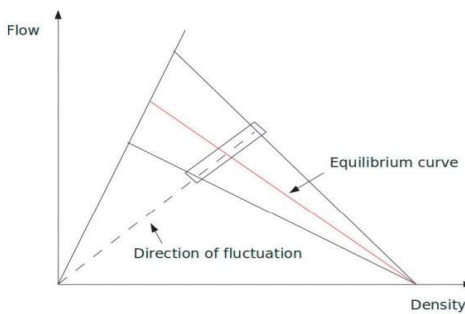
La anterior figura muestra que cualquier tasa de flujo diferente a la de capacidad puede ocurrir bajo dos condiciones, una es con baja densidad y alta velocidad y la otra es con alta densidad y baja velocidad. El lado de las curvas con alta densidad y baja velocidad representa un flujo sobresaturado. El lado de las curvas con baja densidad y alta velocidad representa un flujo por debajo del nivel de saturación.

Los niveles de servicio A a E están definidos en el lado baja densidad y alta velocidad de la curva; el nivel de servicio E es el límite de flujo máximo localizado en la capacidad; y el nivel de servicio F, el cual describe sobresaturación, es representado con el lado alta densidad y baja velocidad de las curvas.

Así, en el estudio de la teoría del flujo de tráfico, el diagrama de densidad de flujo se utiliza para determinar el estado del tráfico de una carretera.

Cabe precisar que, en una formulación más reciente, Li y Zhang (2011), se postuló una nueva estructura para el diagrama fundamental de tráfico, lo concerniente a la relación entre Flujo y Densidad se muestra en la siguiente figura.

Figura 30. Nuevo diagrama fundamental de tráfico: la relación entre flujo y densidad



Fuente: Li and Zhang (2011)

La curva triangular consta de dos vectores. El primer vector es el lado de flujo libre de la curva. Este vector se crea colocando el vector de velocidad de flujo libre de una carretera en el origen del gráfico de densidad de flujo. El segundo vector es la rama congestionada, que se crea colocando el vector de la velocidad de la onda de choque en flujo cero y densidad de atasco. El ramal congestionado tiene una pendiente negativa, lo que implica que cuanto mayor es la densidad en el ramal congestionado, menor es el caudal; por lo tanto, aunque hay más automóviles en la carretera, la cantidad de automóviles que pasan por un solo punto es menor que si hubiera menos automóviles en la carretera. La intersección de los vectores de flujo libre y congestionados es el vértice de la curva y se considera la capacidad de la calzada, que es la condición de tráfico en la cual el número máximo de vehículos puede pasar por un punto en un período de tiempo dado. El flujo y la capacidad en los que se produce este punto es el flujo óptimo y la densidad óptima, respectivamente.

Para efectos prácticos, en los apartados posteriores del presente documento se hará uso del diagrama fundamental de tráfico contenido en el “*Highway Capacity Manual – HCM*”, con base en el establecido en [May \(1990\)](#)

### **3.3.5 Conceptos de calidad y nivel de servicio**

Calidad del servicio describe, desde la perspectiva del viajero, qué tan bien opera la infraestructura o servicio de transporte. Esta puede ser evaluada de diversas maneras, entre las cuales están la observación directa de los factores importantes percibidos por los viajeros (por ejemplo, velocidad o demora), encuestas a viajeros, seguimiento a quejas y reclamos sobre las condiciones de la vía, pronóstico de la satisfacción del viajero usando modelos derivados de anteriores encuestas a viajeros, y observando factores no directamente percibidos por los viajeros (por ejemplo, tiempo promedio para atender y gestionar un incidente) que afectan las medidas que ellos pueden percibir (por ejemplo, velocidad o tiempo de llegada al trabajo).

Los factores que influyen la calidad del servicio percibida por el viajero incluyen los siguientes: Tiempo de viaje, velocidad y demora; número de paradas en las que se incurre; fiabilidad del tiempo de viaje; maniobrabilidad: confort; conveniencia; seguridad; costo al usuario; disponibilidad de instalaciones y servicios; estética de las instalaciones; disponibilidad de información.

El alcance del HCM en lo que respecta a la medición del desempeño multimodal de carreteras e instalaciones de vías es más limitado que el listado de factores antes mencionado, y se enfoca principalmente en el tiempo de viaje, velocidad, demora, maniobrabilidad y confort.

El nivel de servicio (en inglés, *Level of Service LOS*) es una estratificación cuantitativa de la medida o medidas de desempeño que representan la calidad del



servicio. Las medidas usadas para determinar los niveles de servicio para elementos del sistema de transporte son llamados medidas del servicio.

El HCM define 6 niveles de servicio, en un rango desde A hasta F, para cada una de las medidas de servicio o para la resultante de un modelo matemático basado en múltiples medidas de desempeño. El nivel de servicio A representa las mejores condiciones de operación desde la perspectiva del viajero, y el F las peores.

Por costo, impacto ambiental y otras razones, las vías no son usualmente diseñadas para ofrecer un nivel de servicio A durante los periodos pico, sino un nivel de servicio algo menor que refleja un balance entre los deseos individuales del viajero y los deseos de la sociedad y los recursos financieros disponibles. Sin embargo, durante los periodos del día en los que se presenta un bajo volumen los elementos del sistema pueden operar en un nivel de servicio A.

### ***3.3.6 Infraestructuras viarias de flujo ininterrumpido***

El Manual de Capacidad Viaria, en su Volumen 2 (Flujo ininterrumpido) en sus capítulos 10 al 15 presenta conceptos y métodos de análisis para carreteras con flujo ininterrumpido, es decir, carreteras que no tienen causas fijas de demora o interrupción externas al flujo de tráfico.

En particular, se enfoca en 3 tipos: autopistas, carreteras multicarril y carreteras de dos carriles

- Autopistas: Definidas como carreteras separadas con un completo control de acceso y que tienen dos o más carriles en cada dirección dedicados a un uso exclusivo del tráfico.
- Carreteras multicarril: Definidas como carreteras que no tiene un completo control de acceso y que tienen dos o más carriles en cada dirección, con señales de tráfico o rotondas espaciadas al menos 2 millas en promedio.
- Carreteras de dos carriles: Definidas como carreteras con un carril para el tráfico por dirección (excepto carriles para sobrepasos ocasionales o carriles para ascenso de camiones), con señales de tráfico, rotondas o intersecciones controladas con pare, espaciadas al menos 2 millas en promedio.

### ***3.3.7 Autopistas (segmentos básicos)***

Los segmentos básicos de autopistas son definidos como aquellos segmentos de autopista que están por fuera de la influencia de maniobras de convergencia, divergencia o entrecruzamiento. En general, esto quiere decir que la actividad de cambio de carril no está significativamente influenciada por la presencia de rampas o segmentos de entrecruzamiento. La actividad de cambio de carril principalmente

refleja el normal deseo de los conductores de optimizar su eficiencia a través de maniobras de cambio de carril y sobrepaso.

Las condiciones base son aquellas bajo las cuales se alcanza la capacidad completa de un segmento de autopista incluyendo buen clima, buena visibilidad, no incidentes o accidentes, no zonas de trabajo en la vía y no deterioro del pavimento lo suficientemente serio como para afectar la operación. En adelante, a lo largo de esta sección, se entiende que están condiciones existen.

La capacidad de un segmento básico de autopista bajo condiciones base varía con la velocidad a flujo libre (Free Flow Speed FFS). Para un FFS de 70 a 75 millas por hora la capacidad es 2.400 vehículos/hora/carril. Para menores niveles de FFS la capacidad se disminuye ligeramente. Para un FFS de 65 millas/hora la capacidad es 2.350 v/h/c, para 60 millas/hora es 2.300 v/h/c, y para 55 millas/hora es 2.250 v/h/c.

Desde el parámetro de densidad, se cree que un segmento básico de autopista alcanza su capacidad a una densidad aproximada de 45 vehículos/milla/carril, lo cual puede variar ligeramente de locación a locación.

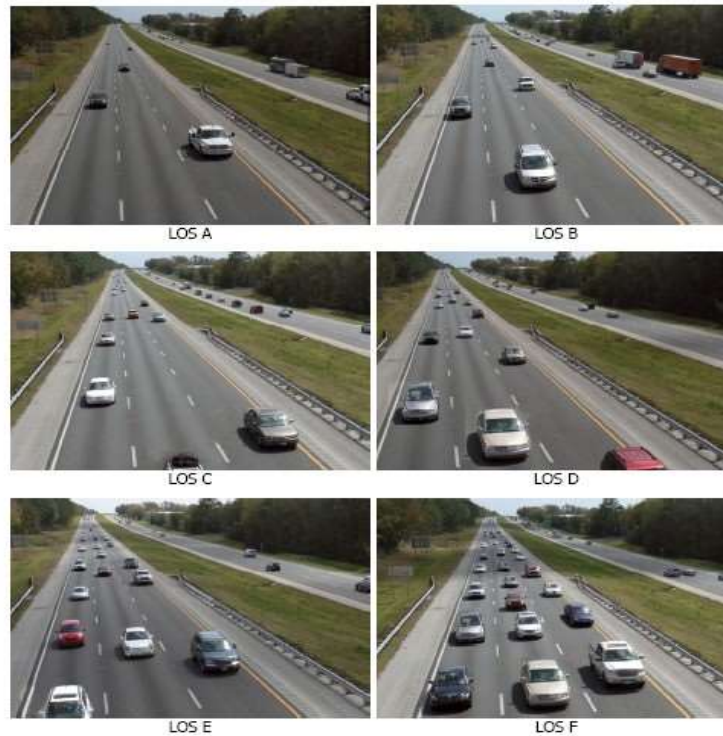
El nivel de servicio en los segmentos básicos de autopista está definido por la densidad. Aunque la velocidad es una mayor preocupación de los conductores en lo que respecta a la calidad del servicio, sería difícil describir el nivel de servicio usando la velocidad dado que esta permanece constante hasta tasas de flujo de 1.000 a 1.800 vehículos/hora/carril, dependiendo de la velocidad a flujo libre. La densidad describe la proximidad a otros vehículos y está relacionada con la libertad de maniobra dentro del flujo de tráfico. A diferencia de la velocidad, la densidad es sensible a la tasa de flujo a lo largo del rango del flujo.

A continuación, se hace una breve descripción de los niveles de servicio:

- El nivel de servicio A describe la operación a flujo libre, donde prevalece la velocidad a flujo libre.
- El nivel de servicio B representa operación razonablemente a flujo libre, donde se mantiene la velocidad a flujo libre.
- El nivel de servicio C describe un flujo con velocidades cercanas a la velocidad de flujo libre.
- El nivel de servicio D describe el nivel en el cual la velocidad empieza a disminuir con flujos crecientes y con una densidad con incrementos más rápidos.
- El nivel de servicio E describe una operación al nivel de la capacidad, se presentan detenciones que se propagan a lo largo del tráfico y no hay capacidad para mitigarlas, incluso llegando a generar colas significativas.
- El nivel de servicio F describe el colapso o inestabilidad del flujo, se presentan embotellamientos con grandes colas. En ese escenario la demanda excede la capacidad.

La Figura 31 muestra de manera visual los 6 niveles de servicio (*Level of Service LOS*) para segmentos básico de autopista.

Figura 31. Visual de los niveles de servicio en segmentos básicos de autopista



*Fuente: TRB (2010) Highway Capacity Manual*

Dado que la velocidad es constante a lo largo de un amplio rango de flujo y el ratio flujo de demanda / capacidad no es directamente discernible para los conductores (excepto cuando el flujo de demanda igual a la capacidad), la medida de servicio para los segmentos básico de autopista es la densidad. Los criterios, con respecto a la densidad, se describen en la siguiente figura.

Tabla 5. Criterios de niveles de servicio (LOS) con base en la densidad

<b>LOS</b>	<b>Density (pc/mi/ln)</b>
A	$\leq 11$
B	> 11–18
C	> 18–26
D	> 26–35
E	> 35–45
F	Demand exceeds capacity > 45

*Fuente: TRB (2010) Highway Capacity Manual*

### 3.3.8 Carreteras multicarril

Las carreteras multicarril generalmente tiene 4 a 6 carriles (incluyendo ambos sentidos) y límites de velocidad entre 40 y 55 millas/hora. Usualmente están localizadas en áreas suburbanas, que conducen hacia ciudades centrales o a lo largo de corredores rurales de alto volumen, conectando dos ciudades o centros de actividad que generan un número sustancial de viajes diarios. Los volúmenes de tráfico en las carreteras multicarril varían ampliamente, pero a menudo tienen demandas entre 15.000 y 40.000 vehículos por día. Usualmente está permitida la circulación de ciclistas.

La capacidad de una carretera multicarril bajo condiciones base varia con la velocidad a flujo libre (Free Flow Speed FFS). Para un FFS de 60 millas por hora la capacidad es 2.200 vehículos/hora/carril. Para menores niveles de FFS la capacidad se disminuye. Para un FFS de 55 millas/hora la capacidad es 2.100 v/h/c, para 50 millas/hora es 2.000 v/h/c, y para 45 millas/hora es 1.900 v/h/c.

Dado que la velocidad es constante a lo largo de un amplio rango de flujo, lo niveles de servicio son definidos con base en la densidad. En la siguiente figura se definen los niveles de servicio (*Level of Service LOS*) en los segmentos de carretera multicarril para el caso específico del modo automóvil.

Tabla 6. Niveles de servicio (LOS) en carreteras multicarril para el modo automóvil

LOS	FFS (mi/h)	Density (pc/mi/ln)
A	All	>0–11
B	All	>11–18
C	All	>18–26
D	All	>26–35
E	60	>35–40
	55	>35–41
	50	>35–43
	45	>35–45
F	Demand Exceeds Capacity	
	60	>40
	55	>41
	50	>43
	45	>45

*Fuente: TRB (2010) Highway Capacity Manual*

Nótese que en las carreteras multicarril la densidad a nivel de capacidad está en un rango de entre 40 vehículos/milla/carril para una velocidad a flujo libre de 60 millas/hora y 45 vehículos/milla/carril para una velocidad a flujo libre de 45 millas/hora.

### **3.3.9 Carreteras de dos carriles**

Las carreteras de dos carriles tienen un carril por sentido para el uso del tráfico. La principal característica que las diferencia de otras infraestructuras de flujo ininterrumpido es que la maniobra de sobrepaso se realiza en el carril opuesto, con lo cual, dicha maniobra está limitada por la disponibilidad de espacio entre los vehículos de la corriente de tráfico opuesta y la suficiente distancia para que un conductor pueda discernir de manera segura con respecto a la aproximación de los vehículos. En tanto que los flujos de demanda y las restricciones geométricas se incrementan, las oportunidades de sobrepaso disminuyen, lo cual crea secciones en la corriente de flujo donde se presentan colas de vehículos sujetos a demoras adicionales.

Dado que en las carreteras de dos carriles la capacidad de sobrepaso decrece conforme la demanda de sobrepaso se incrementa, la calidad de la operación decrece precipitadamente conforme se incrementa el flujo de demanda y la operación se torna inaceptable a un ratio volumen/capacidad relativamente bajo.

Con respecto a la función de las carreteras de dos carriles en el sistema de carreteras se debe precisar que se trata de carreteras localizadas en diversas áreas geográficas y sirven una variedad de funciones. Adicionalmente, se debe anotar que prestan servicios a un número de viajes en bicicleta.

Hay 3 clases de carreteras de dos carriles, las cuales se describen brevemente como sigue:

- Clase I: Carreteras de dos carriles donde los conductores esperan viajar a relativas altas velocidades. Sirven rutas interurbanas, principalmente conectores de grandes generadores de tráfico, rutas de viajes pendulares diarios, principales corredores en rutas estatales y nacionales. Sirven viajes largos, o proveen conexión entre infraestructuras que sirven viajes largos.
- Clase II: Carreteras de dos carriles donde los conductores no necesariamente esperan viajar a relativas altas velocidades. Estas funcionan como accesos a infraestructuras de Clase I. Sirven viajes cortos, que inician o terminan en porciones de viajes más largos.
- Clase III: Carreteras de dos carriles que sirven áreas con desarrollo moderado. Pueden ser porciones de infraestructuras Clase I y Clase II que pasan a través de pequeños pueblos o áreas recreacionales desarrolladas. Dichos segmentos a menudo están acompañados de una reducción de los límites de velocidad que reflejan el alto nivel de actividad en el cual están insertos.

De manera general, su definición se puede entender mejor basándose en su función: Muchos corredores arteriales o corredores troncales son considerados Clase I, mientras colectores o carreteras locales son considerados Clase II o III.

La capacidad de la carretera de dos carriles bajo condiciones base es de 1.7000 vehículos/hora en una dirección (un carril), con un límite de 3.200 vehículos/hora para el total de las dos direcciones (dos carriles, uno por dirección). Dado que hay interacciones entre los flujos de las dos direcciones, cuando la capacidad de 1.700 vehículos/hora en una dirección es alcanzada, el flujo opuesto máximo estaría limitado a 1.500 vehículos/hora.

En lo que respecta a los niveles de servicio (*Level of Service LOS*) para el modo automóvil, las carreteras de dos carriles incorporan 3 medidas de efectividad. La velocidad promedio de viaje (*Average Travel Speed ATS*), el porcentaje de tiempo gastado en fila (*Percent Time-Spent-Following PTSF*) y el porcentaje de velocidad a flujo libre (*Percent of Free-Flow Speed*). El nivel de servicio para la Clase I se define con base en ATS y PTSF, el de Clase II con base en PTSF y el de Clase III con base en PFFS, como lo describe la siguiente figura.

Tabla 7. Niveles de servicio (LOS) en carreteras de dos carriles para modo automóvil

LOS	Class I Highways		Class II Highways	Class III Highways
	ATS (mi/h)	PTSF (%)	PTSF (%)	PFFS (%)
A	>55	≤35	≤40	>91.7
B	>50-55	>35-50	>40-55	>83.3-91.7
C	>45-50	>50-65	>55-70	>75.0-83.3
D	>40-45	>65-80	>70-85	>66.7-75.0
E	≤40	>80	>85	≤66.7

*Fuente: TRB (2010) Highway Capacity Manual*

### 3.3.10 Infraestructuras viarias de flujo interrumpido

El Manual de Capacidad Viaria, en su Volumen 3 (Flujo interrumpido) Capítulo 17, aborda el tema de los segmentos de vías urbanas a partir de una metodología para evaluar la capacidad y calidad del servicio ofrecido a los usuarios de modos motorizados viajando a lo largo de estos. Dicha metodología es aplicable a segmentos de vía urbana tanto de la red arterial como colectora, con un flujo de tráfico en una o dos direcciones, y en las cuales las intersecciones pueden ser señalizadas o no.

### 3.3.11 Los criterios del nivel de servicio

El nivel de servicio es considerado como una medida de desempeño entre otras medidas diferenciadas por grupos de usuarios de la vía, entre las cuales se incluye la velocidad de viaje del automóvil, el porcentaje de paradas del automóvil, el puntaje de percepción del viajero en automóvil, la velocidad de viaje del peatón, el puntaje de percepción del peatón, la velocidad de viaje en bicicleta, el puntaje de

percepción del usuario de la bicicleta, la velocidad de viaje en vehículo de transporte público y el puntaje de percepción del usuario del transporte público, entre otras.

Así, el nivel de servicio tiene diversos criterios dependiendo del modo de transporte, ya sea automóvil, peatón, bicicleta o transporte público, siendo el criterio para el modo automóvil diferente del criterio de los otros modos.

De manera particular, el criterio para el modo automóvil está basado en medidas de desempeño que son medibles en campo y percibidas por los viajeros; mientras el criterio para los modos peatón y bicicleta está basado en puntajes reportados por los viajeros indicando su percepción sobre el viaje y el del modo transporte público está basado en cambios medidos en términos de número de pasajeros transportados debido a cambios en la calidad del servicio.

### ***3.3.12 El modo automóvil***

Para el caso del modo automóvil en segmentos de vías urbanas, se usan dos medidas de desempeño para caracterizar el nivel de servicio para una dada dirección de viaje a lo largo de un segmento de vía urbana: velocidad de viaje de los vehículos y ratio volumen-capacidad. La velocidad de viaje de los vehículos refleja los factores que influyen el tiempo de desplazamiento a lo largo del arco y la demora incurrida en las intersecciones. El ratio volumen-capacidad indica el grado de movilidad que provee el segmento.

A continuación, se caracterizan los diferentes niveles de servicio para el modo automóvil.

- Nivel de servicio A: Describe la operación a flujo libre. Los vehículos no tienen ningún tipo de impedimento para maniobrar en el flujo de tráfico. Las demoras por dispositivos de control en los límites de las intersecciones son mínimas. La velocidad de viaje excede el 85% de la velocidad a flujo libre en condiciones base, y el ratio volumen-capacidad no es mayor a 1,0.
- Nivel de servicio B: Describe una operación razonablemente sin impedimentos. La habilidad para maniobrar en el flujo de tráfico está ligeramente restringida y las demoras por dispositivos de control en los límites de las intersecciones no son significativas. La velocidad de viaje está entre el 67% y el 85% de la velocidad a flujo libre en condiciones base, y el ratio volumen-capacidad no es mayor a 1,0.
- Nivel de servicio C: Describe una operación estable. La habilidad para maniobrar y hacer cambios de carril en localizaciones medias de los segmentos puede estar más restringida que en el nivel de servicio B. Colas más largas en los límites de las intersecciones pueden contribuir a velocidades de viaje más bajas. La velocidad de viaje está entre el 50% y el 67% de la velocidad a flujo libre en condiciones base, y el ratio volumen-capacidad no es mayor a 1,0.

- Nivel de servicio D: Indica una condición menos estable en la cual pequeños incrementos en flujo pueden causar incrementos sustanciales en demoras y en reducción de la velocidad de viaje. Este tipo de operación puede deberse a una desfavorable señalización, alto volumen, o inapropiados tiempos de la señalización en los límites de las intersecciones. La velocidad de viaje está entre el 40% y 50% de la velocidad a flujo libre en condición base, y el ratio volumen-capacidad no es mayor a 1,0.
- Nivel de servicio E: Se caracteriza por una operación inestable y demoras significativas. Tal operación puede deberse a la combinación de una progresión adversa, alto volumen e inapropiados tiempos en la señalización en el límite de la intersección. La velocidad de viaje está entre el 30% y el 40% de la velocidad a flujo libre en condición base, y el ratio volumen-capacidad es no mayor a 1,0.
- Nivel de servicio F: Se caracteriza por un flujo a una velocidad extremadamente baja. La congestión ocurre probablemente en los límites de la intersección, altas demoras y colas extensas. La velocidad de viaje es igual o menor al 30% de la velocidad a flujo libre en condición base, o el ratio volumen-capacidad es mayor a 1,0.

Tabla 8. Niveles de servicio (LOS) del automóvil en vías urbanas

Travel Speed as a Percentage of Base Free-Flow Speed (%)	LOS by Volume-to-Capacity Ratio <sup>a</sup>	
	≤1.0	> 1.0
>85	A	F
>67–85	B	F
>50–67	C	F
>40–50	D	F
>30–40	E	F
≤30	F	F

Note: <sup>a</sup>Volume-to-capacity ratio of through movement at downstream boundary intersection.

Fuente: *TRB (2010) Highway Capacity Manual*



#### **4 MODELIZACIÓN DE LA OFERTA ÓPTIMA DE VIARIO**

Dado el volumen de tráfico y la limitación a la expansión de la capacidad viaria, el problema de los costes externos en términos de congestión, accidentalidad, ruido y contaminación ambiental, se acentúa en las áreas urbanas y cuestiona su sostenibilidad en el futuro. Ello es particularmente cierto para los costes de congestión<sup>1</sup> considerados como el componente más importante (2%) de un total en costes externos estimado de manera conservadora para los países europeos alrededor del 4.5% del PIB en [OCDE \(1994\)](#).

Dicha preponderancia de los costes externos de congestión sobre el resto, justifican la decisión de tomar a la congestión (cuyo coste generalmente se produce fundamentalmente en términos de tiempo, -aunque en menor medida también se incrementan los costes de circulación-) como el componente base para el desarrollo del instrumento alternativo de gestión de la demanda de transporte aquí presentado. Otros factores para dicha decisión, son que para los otros tres tipos de impactos (accidentalidad, ruido, y contaminación ambiental) la evidencia empírica disponible acerca de la relación entre coste marginal externo y nivel de output no es tan clara como para la congestión, además que su valoración económica incorpora un mayor grado de incertidumbre.

Así, en el presente documento se formula un instrumento alternativo de gestión de la movilidad denominado Retribución de Espacio Viario según Costes Sociales de Congestión (en inglés, *Road Space Retribution Charge by Congestion Costs*), en adelante notado como SRC; cuyos primeros avances fueron publicados, en el marco del programa de doctorado, en el artículo “*Road Space Reallocation According to Car Congestion Externality*” en el *Journal of Urban Planning and Development* en Septiembre de 2011 (ver [González-Guzmán and Robusté, 2011](#)).

El SRC expresa el porcentaje de espacio viario destinado al vehículo privado -en una vía estratégica para la movilidad urbana- que debe ser transferido a otros modos de transporte de mayor eficiencia ambiental en función de la internalización de los costes externos de congestión generados por el vehículo privado.

Con dicha transferencia de espacio viario del vehículo privado al transporte público -y otros modos de movilidad sostenible-, se impone al vehículo privado una penalización en unidades de tiempo -relacionada con una penalización monetaria de tasa óptima- que incremente su tiempo de viaje por el arco regulado, de manera que favorezca una reasignación más eficiente del tráfico en la red, y un cambio en la elección modal orientado hacia el transporte público.

En otras palabras, se trata del uso del nivel de congestión como regulador del reparto modal y la elección de ruta.

---

<sup>1</sup> Un estudio de IWW/INFRAS (2000) ha estimado que entre un 70 y un 80% de los costes de congestión se generan en los entornos urbanos.

Como una primera aproximación al desarrollo de esta herramienta, se usa el “first best” como sistema de precios, las externalidades consideradas se limitan a la congestión, y se presenta un primer análisis para el caso simple de dos rutas, al igual que las diversas alternativas de implementación práctica.

El método del “first best” es usado aquí de acuerdo a autores como Santos y Newbery (2001), Yang y Zhang (2003) y Vivas (2008) entre otros, quienes aceptan el uso de este cuando se trata de estimar la tasa por congestión aplicada a un caso simple de dos rutas, pero no para el caso de complejas redes, dado que en estas últimas puede dar lugar a inequidades en la fijación de la tarifa para diversos arcos de la red y su gran dificultad de implementación práctica.

Algunas consideraciones fundamentales:

- (a) Se plantea la existencia de una equivalencia entre un instrumento de regulación monetaria como el peaje urbano basado en una tarifa óptima y un instrumento de regulación espacial basado en la reducción de espacio viario al vehículo privado como el SRC, en tanto que ambos (el primero mediante penalización monetaria y el segundo mediante penalización en tiempo de viaje) pueden ejercer un efecto desincentivador del uso generalizado del vehículo privado sobre un arco determinado, a partir de la reducción del excedente del consumidor (usuario).
- (b) En el caso del instrumento de regulación espacial SRC el inicial incremento del tiempo de viaje producido por la reducción de espacio viario al vehículo privado y la transferencia de este al transporte público, produce una mejora de la movilidad en tanto que genera una reasignación más eficiente del tráfico de vehículo privado en la red (traspasando tráfico del arco intervenido hacia otros arcos subutilizados o menos congestionados) y un cambio modal del vehículo privado hacia el transporte público, cuyo tiempo de viaje se ve mejorado.
- (c) Se trata en principio, de una intervención aplicada a un corredor gestionado identificado como de carácter estratégico para la movilidad de la ciudad y sobre el cual se hace necesario dar prioridad a los sistemas de transporte público (y otros modos no motorizados), con lo cual la penalización se establece a partir de la congestión existente calculada para dicho corredor. Es posible ampliar la aplicación de este instrumento al caso de un área de regulación (en particular el centro de la ciudad donde la congestión es mayor) identificando al interior de esta un conjunto de arcos estratégicos a intervenir y estableciendo la penalización a partir de la congestión existente calculada para dicha área, pero ello implica necesariamente hacer unas consideraciones adicionales.
- (d) El SRC busca una reducción del excedente del consumidor (excedente del conductor del vehículo privado) expresado en unidades de tiempo. Dado que el excedente del consumidor es la diferencia entre la cantidad máxima que los conductores están dispuestos a pagar en tiempo por usar un corredor

dado y lo que en la actualidad están pagando por usarlo, al reducir dicho excedente (incrementando el precio, es decir induciendo una demora adicional) se fomenta un uso más racional de la infraestructura ya que potencia que menos conductores estén dispuestos a elegir viajar a través del corredor regulado pues les implica un mayor tiempo de viaje frente a otras alternativas más competitivas como lo son otros arcos no regulados y otros modos de transporte.

- (e) Se entiende que el papel de regulación de este instrumento radica no solo en el acto mismo de reducir el espacio viario, pues en primera instancia esto genera más congestión, sino en el efecto que esta demora adicional tiene en la toma de decisión del usuario en el nuevo escenario, que hace posible que se presente una reducción de la demanda sobre el arco intervenido tanto por reasignación en la red como por cambio modal al transporte público.
- (f) En principio, se excluye el análisis de la redistribución del recaudo, tanto por razones prácticas como para evitar posibles interpretaciones del bienestar social que invaliden la equivalencia planteada entre el modelo clásico de tarifa óptima por congestión y el modelo alternativo SRC aquí propuesto. Esta decisión se soporta en el hecho de que en la práctica en el modelo clásico de la tarifa óptima por congestión no se realiza una redistribución directa del recaudo del peaje ni entre los conductores que deciden no usar la vía regulada ni mucho menos entre la población del sector de influencia de la misma que soporta los efectos negativos del tráfico. Sin embargo, en el presente documento lo que sí se considera es una redistribución indirecta del recaudo del peaje, entendida en forma de inversión para la mejora del servicio de transporte público.
- (g) La ganancia neta generada por este instrumento alternativo (SRC), puede ser entendida como el conjunto de externalidades negativas que la sociedad deja de soportar con la reducción del tráfico privado, y se busca incrementar dicha ganancia neta en detrimento del beneficio marginal del usuario del vehículo privado.

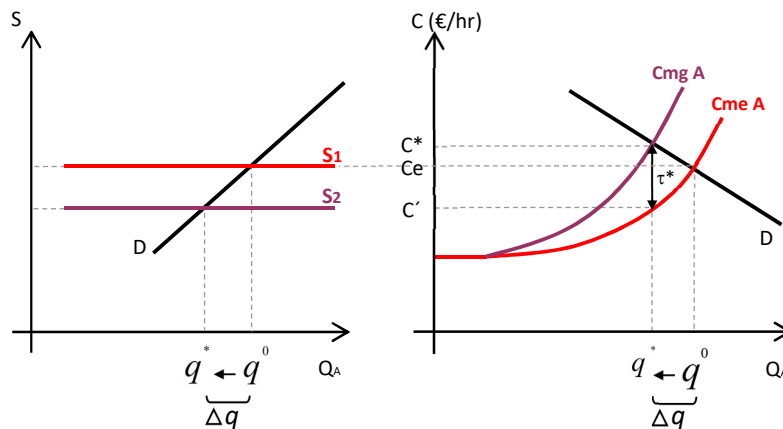
#### **4.1 La relación entre tarifa por congestión y reducción de oferta viaria**

La reducción de la oferta viaria al vehículo privado y la tarifa por congestión pueden ser instrumentos con similar capacidad de reducir la cantidad de viajes en vehículo privado, en tanto que sus penalizaciones (la primera espacial –que afecta el tiempo de viaje- y la segunda monetaria) reducen la disposición del conductor a usar el arco intervenido al reducir el excedente del consumidor.

Como lo muestra la Figura 32, dado que la cantidad de viajes inicial o de equilibrio  $q^0$  está ligada a los costes medios (Cme) y la oferta viaria inicial (S1), se puede establecer una relación entre la variación –reducción- de viajes en vehículo privado ( $\Delta q$ ) de ambos esquemas.

Esta relación debe ser entendida desde la perspectiva de que ambos instrumentos pueden generar una similar reducción del bienestar individual del conductor del vehículo privado.

Figura 32. Relación entre los esquemas reducción de oferta de espacio viario y tasa óptima por congestión



*Una variación en el número de viajes en vehículo privado ( $Q$ ) puede depender de una variación en el coste de viaje ( $C$ ) o de una variación en la oferta viaria ( $S$ ). La reducción de la oferta viaria ( $S$ ) genera una reducción del número de viajes ( $Q$ ). Dicha reducción de viajes puede guardar relación con aquella generada por la imposición de una tasa por congestión que internaliza los costes marginales sociales del conductor.*

Fuente: *González-Guzmán and Robusté (2011)*

Por una parte, la teoría clásica de la tarifa óptima en la cual se basa la tasa por congestión (esquema de la derecha en la Figura 32) busca una reducción de la demanda de viajes en vehículo privado ( $Q$ ) mediante la imposición de una penalización monetaria ( $\tau^*$ ) que hace que el conductor internalice sus costes sociales marginales (en este caso la congestión, es decir, la demora adicional que genera a los otros conductores en la vía). El incremento del coste, hasta un coste óptimo ( $C^*$ ), genera una reducción de la cantidad de viajes desde  $q^0$  (relacionado con la intersección de costos medios y beneficio marginal –demanda-) hasta  $q^*$  (relacionado con la intersección de costos sociales y beneficio marginal).

Por otra parte, la reducción de la oferta viaria al vehículo privado y su transferencia al transporte público –y otros modos no motorizados- en la cual se basa el SRC (esquema de la izquierda en la Figura 32) busca una reducción similar de la demanda

de viajes en vehículo privado (Q) mediante una penalización espacial pasando de una oferta viaria inicial (S1) a una oferta viaria final (S2), asumiendo que en el corto plazo la oferta viaria (S) es constante. La reducción de la oferta viaria genera una reducción de la demanda de viajes en vehículo privado de  $q^0$  a  $q^*$ , dado que sitúa al conductor en un escenario en el cual ante una inicial demora adicional puede optar por elegir una ruta alternativa o el transporte público que presenta un mejor tiempo de viaje. Los usuarios que dejan de usar la vía hacen posible un nuevo escenario con una mejor movilidad.

## 4.2 La penalización al vehículo privado en unidades de tiempo

En el presente apartado se aborda la penalización al vehículo privado en unidades de tiempo, incluyendo el planteamiento, la formulación matemática y el método de resolución.

Siguiendo parte del enfoque metodológico planteado en [Daganzo \(1995\)](#), en el que se utiliza un modelo simple de oferta y demanda para explorar las posibilidades de una estrategia de control alternativa a la clásica tarifa por congestión; en sí, consideramos un escenario simple de dos rutas que consiste en un solo arco congestionado y de otras alternativas para ir de un origen a un destino. La naturaleza espacial del instrumento de regulación aquí propuesto (*Road Space Retribution Charge by Congestion Costs, SRC*) ha requerido realizar algunas adaptaciones de la metodología mencionada.

Cuatro supuestos básicos:

- (a) Un arco congestionado (embotellamiento).

Asumimos que los usuarios deciden diariamente si viajan a través del embotellamiento (ejemplo: commuting al trabajo), y que el tiempo de viaje adicional debido a la congestión,  $T$ , es una función únicamente del flujo  $Q$  (o cantidad de viajes), que elige usar el arco congestionado o embotellamiento, esto es,  $T=T(q)$ . La función  $T(q)$ , llamada función de congestión, se asume que es creciente, y que es 0 en  $q=0$

- (b) Tiempo y costo fijos para no usuarios.

En principio no se especifica lo que hacen los usuarios que no eligen el embotellamiento. Sea lo que sea que ellos hagan (elegir otra ruta, usar transporte público, etc.), se asume que su tiempo de viaje y costos son independientes de  $Q$ . Estos costos incluyen no solo cualquiera de los costos de bolsillo (ejemplo: tarifas de transporte público), sino también el costo de oportunidad de no usar el embotellamiento. Este último puede ser muy grande para aquellos usuarios que optan por prescindir del viaje del todo. Los tiempos de viaje también pueden variar enormemente.

Para cuantificar las utilidades de no usuarios en la forma más simple posible, denotamos por  $C$  y  $T$ , la diferencia del costo y tiempo de usar el embotellamiento (cuando no hay congestión,  $q=0$ , y no hay peajes) y el costo y tiempo de no usarlo. Estas cantidades que pueden ser positivas o negativas y que se asume son independientes de  $Q$ , diferirán significativamente entre individuos. En sí, estas pueden ser vistas como variables aleatorias, variando a través de los diferentes usuarios.

La distribución conjunta de estas variables aleatorias es definida dividiendo la población en clases  $i$  de individuos idénticos (con  $C=c_i$  y  $T=t_i$ ), y especificando la fracción de la población,  $f_i$ , correspondiente a cada clase.

(c) Utilidad lineal.

Se asume que los usuarios eligen diariamente la alternativa con más alta utilidad. Asumimos que la utilidad extra,  $U_i$ , de usar el embotellamiento en cualquier día dado respecto a la alternativa de no embotellamiento, es una función lineal del costo y tiempo relativo al embotellamiento, y tal función es la misma para todos los individuos de una misma clase. Así podemos definir dos constantes negativas para cada clase,  $b_{ci}$  y  $b_{ti}$ <sup>2</sup>, las cuales dan el coeficiente con el cual, los individuos de una clase convierten dinero y tiempo en utilidad.

El ratio  $\alpha_i = b_{ti}/b_{ci}$ , es una constante positiva que representa el valor del tiempo para cada clase  $i$ . Estas constantes son también vistas como el resultado de variables aleatorias  $B_c$ ,  $B_t$ , y  $A$ ,

(d) No redistribución directa del recaudo.

Se asume conservadoramente y por razones prácticas, que el recaudo de la tarifa por congestión no es retornado a la población, esto nos permite eliminar de nuestro análisis el controversial asunto de la redistribución del recaudo. No obstante, una redistribución indirecta sí es considerada a manera de inversión para la mejora del servicio de transporte público.

El supuesto (a) da el tiempo relativo del embotellamiento como una función de  $Q$ . La variable  $q$  puede ser vista aquí como un flujo diario según número de viajes en un día (o en el periodo pico), como la unidad de medida para cantidad de viaje. La especificación de congestión por medio de una simple función de congestión  $T(q)$  es una burda aproximación de la realidad, que resulta suficiente cuando la medida para la reducción de la congestión a ser evaluada, permanece vigente y sin modificación durante el periodo de mayor demanda (como se plantea en el presente

---

<sup>2</sup> La diferencias  $\Delta c_i$  y  $\Delta t_i$  son negativas para quienes usan el embotellamiento, y como las constantes  $b_{ci}$  y  $b_{ti}$  son negativas, la utilidad es positiva. Para quienes usan otros modos, la utilidad de usar el embotellamiento se hace negativa.

documento). Medidas para reducción de la congestión, que varíen durante las horas del día, requieren un modelo más detallado de fácil ejecución.

El supuesto (b) estipula que el costo extra del embotellamiento permanece fijo<sup>3</sup>. Aunque en realidad este costo debe también depender de  $Q$ , esta dependencia debe ser más débil –y un determinante más débil de la elección de ruta- que la dependencia del tiempo de viaje; así que está ignorada aquí.

El supuesto (c) implica que los usuarios están dispuestos a cambiar costo por tiempo en proporciones constantes, sin tener en cuenta el monto involucrado. Este supuesto comúnmente hecho, es cuestionable para usuarios sujetos a límites de tiempo de llegada, y debe ser tratado en el futuro.

La suposición nos permite expresar la utilidad extra del embotellamiento para una clase específica  $i$ , como una función del costo y tiempo relativo del embotellamiento ( $c_i$  y  $t_i$ ) experimentado por los miembros de la clase  $i$ , el estado de congestión del embotellamiento ( $T$ ), y la tarifa a pagar ( $\tau$ ). Dado que se trata de un instrumento de regulación espacial –reducción de oferta viaria- el peaje pagado  $\tau$ , es la penalización monetaria que incluye el coste externo del viaje para una oferta viaria inicial y el coste extra ligado a la reducción de espacio viario hasta una oferta viaria final.

Específicamente, la utilidad extra del embotellamiento para los usuarios de una clase  $i$ , es:

$$U_i = b_{ci}(\Delta c_i + \tau) + b_{ti}(\Delta t_i + T(q))$$

donde:

$\tau$  : penalización monetaria que incluye el coste externo del viaje en la oferta viaria inicial y el coste extra ligado a la reducción de espacio viario hasta una oferta viaria final.

$T(q)$  : tiempo debido a la congestión, cuando  $q$  viajes escogen pasar por el embotellamiento.

$\Delta c_i, \Delta t_i$  : diferencias de coste y de tiempo entre el embotellamiento y otros modos cuando  $q = 0$  y no hay tarifas.

$b_{ci}, b_{ti}$  : estos parámetros son las utilidades marginales del dinero y del tiempo.

$b_{ti}/b_{ci}$  : este ratio es el valor del tiempo  $i$  para la clase  $i$ .

Nótese que nada se ha dicho en cuanto a cómo la sociedad debe valorar las utilidades de diferentes usuarios o clases de usuarios. Esta asunción (controversial) del enfoque del bienestar social puede ser evitada, no buscando una única medida para el mejoramiento resultante en bienestar social.

Como se busca maximizar la utilidad de cada clase  $i$ , no interesa cómo valore la sociedad las utilidades individuales, con lo cual se trataría de minimizar el coste generalizado  $C_i$  de cada categoría, esto es:

$$C_i = U_i/b_{ci} = (\Delta c_i + \tau) + \alpha_i(\Delta t_i + T(q)).$$

---

<sup>3</sup> Cuando  $q$  aumenta, se asume que  $\Delta c_i$  permanece constante (los costes de operación y las tarifas no varían tanto con la congestión como lo hace el tiempo), mientras que la diferencia de tiempos aumenta en la cantidad  $T(q)$

Esta expresión equivalente<sup>4</sup>, sería más adecuada que la de utilidad porque es más fácil de estimar el valor del tiempo,  $\alpha_i$ , que las constantes de conversión de tiempo y dinero,  $b_{ci}$  y  $b_{ti}$ .

### Una clase socioeconómica.

#### La demanda latente.

Es conveniente definir una función bi-variante,  $q$ , de tiempo y dinero, la cual da la demanda latente para el embotellamiento como una función del tiempo de congestión  $T$ , y el peaje cobrado  $\tau$ . Por demanda latente nos referimos a la cantidad de viajes que estarían en disposición de usar el embotellamiento bajo condiciones específicas. Sin regulación, la demanda latente se materializa, y se convierte en flujo,  $q$ .

Como se asume que la utilidad es lineal, lo cual indica que el embotellamiento es elegido por la clase  $i$ , si la utilidad relativa en unidades de tiempo para el embotellamiento es positiva; entonces para los que usan el embotellamiento  $C_i < 0$  ( $U_i > 0$ ), se puede definir la demanda como la siguiente función de probabilidad.

$$\begin{aligned} q(\tau, T) &= Pr\{U_i > 0\} = Pr\{C_i < 0\} = \\ &= Pr\{(\Delta c_i + \tau) + (\Delta t_i + T_{(q)}) < 0\} = \\ &= Pr\{-(\Delta c_i/\alpha + \Delta t_i) > T_{(q)} + \tau/\alpha\} \end{aligned}$$

La cantidad  $-(\Delta c_i/\alpha + \Delta t_i)$  de la anterior inequación, puede ser vista como una variable aleatoria  $R$ , que representa la ventaja equivalente en tiempo del embotellamiento cuando  $q = 0$  y  $\tau = 0$  (es decir, como si el embotellamiento estuviera descongestionado). La cantidad  $T_{(q)} + \tau/\alpha$ , puede ser interpretada como el tiempo de penalización implicado por la congestión y los peajes.

Así, si permitimos que  $F_R$  denote la función complementaria de distribución de la variable  $R$  (la cual es una función decreciente independiente de la estrategia de control), entonces  $q(\tau, T)$  puede ser expresado como:

$$q(\tau, T) = F_R(T + \tau/\alpha)$$

Simplemente se establece que, si el tiempo de ventaja (ahorro de tiempo) del embotellamiento excede el tiempo de penalización implicado por la congestión y el peaje,  $y = T + \tau/\alpha$ , los usuarios elegirán usar el embotellamiento; de otra forma no lo harán. Dado que cada usuario que elija el embotellamiento le será permitido usarlo, la ecuación  $q(\tau, T) = F_R(T + \tau/\alpha)$ , nos da el flujo,  $q$ , del embotellamiento, - los viajes que están dispuestos a usar el embotellamiento-.

<sup>4</sup> Esta expresión equivalente, obvia la necesidad de conocer las constantes de conversión de utilidad,  $b_{ci}$  y  $b_{ti}$ , lo cual es afortunado porque mientras el "valor del tiempo"  $\alpha_i$ , puede ser burdamente estimado, las  $b$  solo pueden ser determinadas experimentalmente hasta una constante multiplicativa para cada clase. Como resultado, comparaciones objetivas de las utilidades de las clases no pueden ser hechas, y esto es por lo que estas son evitadas en este artículo.



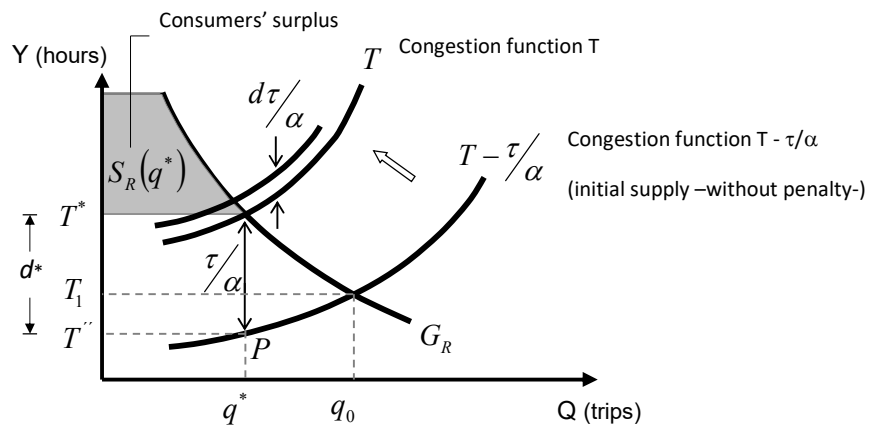
La función complementaria de distribución  $F_R$  de la variable R, es representada en Daganzo (1995), con el flujo en el eje de las ordenadas (eje vertical), y los costes de tiempo y tarifa en las abscisas (eje horizontal), es decir  $q(\tau, T) = F_R(T + \tau/\alpha)$ . Al igual que en Robusté y Sarmiento (1999), aquí se utilizará una función inversa  $G_R = F_R^{-1}$ , con tal de seguir utilizando la convención de ubicar los costes en las ordenadas (eje vertical), y el flujo o la cantidad de viajes en las abscisas (eje horizontal).

Entonces, en vez de expresar la demanda como  $q(\tau, T)$ , se expresará como  $p(t, T_{(q)})$ , es decir, coste en unidades de tiempo en función de  $q$ . (Figura 33).

$$p(t, T_{(q)}) = G_R(T + \tau/\alpha)$$

La Figura 33, representa una hipotética curva relacionando el flujo (o cantidad de viajes) resultante  $q$ , para un tiempo de penalización  $y$ . Esta figura muestra también, una curva de oferta con tarifa, expresada como  $T$ . Un aumento diferencial de la tarifa desplaza a la función de oferta  $T$  en  $d\tau/\alpha$  unidades de tiempo. Así también la eliminación de la tarifa lleva a un desplazamiento  $-\tau/\alpha$ , resultando así, una curva de oferta sin tarifa  $T - \tau/\alpha$ , y el punto de equilibrio  $(q_0, T_1)$ . La intersección de las curvas  $G_R$  y  $T$ , y su proyección en la curva sin tarifa es la terna  $(q^*, T'', T^*)$ . (Nótese que  $T''$  es la ordenada de la abscisa  $q^*$  en la curva sin tarifa).

Figura 33. Análisis de equilibrio con curva de oferta nueva según penalización y con coste en unidades de tiempo



El incremento del tiempo de viaje ( $Y$ ) genera una reducción de la cantidad de viajes en vehículo privado ( $Q$ ). Dicho incremento en  $Y$  se realiza por medio de una reducción de la oferta viaria al vehículo privado, pasando de una curva de congestión inicial a una nueva curva de congestión con regulación. La reducción del espacio viario al vehículo privado se basa en una penalización real en tiempo de viaje ( $d^*$ ), establecida a partir de una penalización monetaria  $\tau$  (que incluye la tarifa óptima para una oferta viaria inicial y la variación del coste de viaje ligada a la reducción de la oferta viaria) y un valor subjetivo del tiempo  $\alpha$ .

Fuente: González-Guzmán and Robusté (2011) adaptado de Daganzo (1995) y Robusté y Sarmiento (1999)

Para la clase  $i$ , la utilidad relativa al embotellamiento expresada en unidades de tiempo es la diferencia entre el tiempo de ventaja (ahorro de tiempo) del embotellamiento,  $r_i$ , y el tiempo de penalización implicado por la congestión y la tarifa,  $y$ .

Para la clase  $i$ , la utilidad del embotellamiento no debe ser negativa –dado que diferencias negativas entre tiempo de ahorro y tiempo de penalización, resultan en un no uso-, esto es:

$$\begin{aligned} U_i &= \max\{0, U_i\} = \max\{0, b_{ci}C_i\} = \\ &= \max\{0, b_{ci}[(\Delta c_i + \tau) + \alpha(\Delta t_i + T)]\} \\ U_i &= \max\{0, -b_{ti}[-(\Delta c_i/\alpha + \Delta t_i) - (T + \tau/\alpha)]\} = \\ &= (-b_{ti}) \max\{0, (r_i - y)\} \end{aligned}$$

$$\text{donde, } r_i = -(\Delta c_i/\alpha + \Delta t_i) \text{ e } y = (T + \tau/\alpha)$$

La utilidad relativa del embotellamiento expresada en unidades de tiempo es:

$$\max\{0, U_i\} / (-b_{ti}) = \max\{0, (r_i - y)\}$$

$$\text{Utilidad en unidades de tiempo para la clase } i = \max\{0, (r_i - y)\}$$

La utilidad en unidades de tiempo para la clase  $i$  en equilibrio está dada por la anterior ecuación:

$$U_i \text{ en unidades de tiempo} = \max\{0, (r_i - y)\}, \text{ con } y = T^*$$

Está claro, de acuerdo a la Figura 33, que  $T^*$  se incrementa al incrementarse la tarifa  $\tau$ , y por lo tanto,  $U_i$  en unidades de tiempo  $= \max\{0, (r_i - y)\}$  no puede crecer para ningún  $i$  cuando la tarifa  $\tau$ , es incrementada. En efecto, la utilidad de todos los conductores es reducida cuando es introducida una tarifa.

Nótese que la expectativa de  $U_i$  en unidades de tiempo  $= \max\{0, (r_i - y)\}$ , a través de  $i$ , es el excedente del consumidor expresado en unidades de tiempo, dado por el área sombreada por encima de  $T^*$  en la Figura 33. Este excedente del consumidor decrece cuando la tarifa es incrementada.

Si se tienen distintas clases socioeconómicas y  $f_i$  es la fracción de usuarios que pertenecen a cada una, el beneficio –excedente- del consumidor en unidades de tiempo es  $\sum(f_i \max\{0, U_i\})$ . Por lo tanto, el beneficio del consumidor es:  $-b_{ti}E[\max\{0, (R - y)\}]$ .

El equilibrio se halla cuando  $y = T^*$ , y el beneficio del consumidor en unidades de tiempo,  $S_R$ , es:

$$S_R = E[\max\{0, (R - T^*)\}]$$

el cual, se representa en la Figura 33 por el área sombreada  $S_R$  por encima de la ordenada  $T^*$ . Donde  $E$  es el operador de esperanza matemática. Este beneficio del consumidor también puede escribirse como  $S_R = S_R(q^*)$ , donde  $q^*$  es la abscisa de  $T'' + \tau/\alpha$ . Este beneficio del consumidor, disminuye al aumentar  $\tau$ , como se observa en la Figura 33, cuando se incrementa la tarifa  $d\tau/\alpha$  unidades equivalentes de tiempo.

La expresión  $\tau/\alpha$  es una penalización teórica al vehículo privado en unidades de tiempo. Esta penalización teórica al ser materializada en la práctica mediante una reducción del espacio viario (por ejemplo reduciendo 1 carril para el vehículo privado) se convierte en una penalización real en unidades de tiempo denominada  $d^*$ , la cual será superior a la teórica dada la naturaleza espacial de la medida (reducción de espacio viario) y dado que el número de carriles es un valor discreto, lo que siempre implica en la práctica una sobre-penalización (cuyos rangos máximos han de ser establecidos en función de la oferta viaria inicial).

Así, la penalización real en unidades de tiempo  $d^*$  incluye tanto la tarifa óptima calculada a partir de los costes externos para una oferta viaria inicial como los costes extras asociados a la reducción de la capacidad viaria.

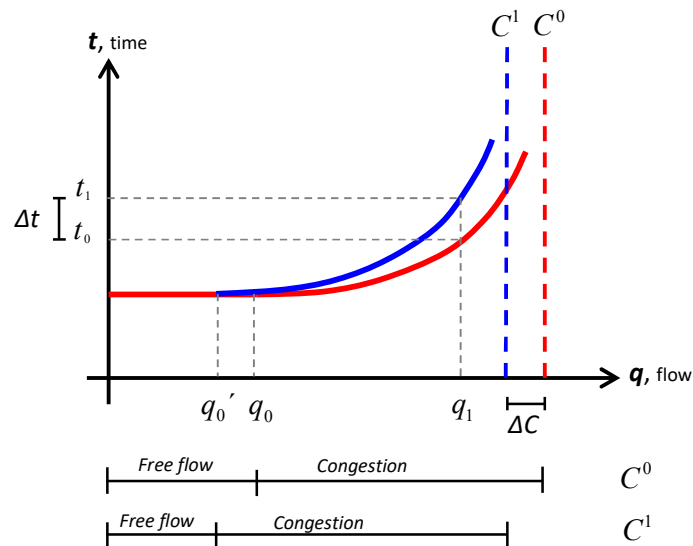
### **4.3 La reducción de espacio viario al vehículo privado**

Desde la perspectiva de la ingeniería de tráfico (ver Figura 34) una reducción en la capacidad viaria de  $C^0$  a  $C^1$  (aplicando una reducción de carriles al vehículo privado y transfiriéndolos al transporte público y otros modos de transporte), implica un cambio en la curva de congestión de la vía desplazando su punto de saturación hacia la izquierda. Así, para un determinado nivel de flujo de vehículos privados  $q_1$  se produce un incremento en su tiempo de viaje de  $t_0$  a  $t_1$ .

La Figura 34 muestra que la reducción de la capacidad viaria al vehículo privado  $\Delta C$  será la óptima cuando la resultante variación del tiempo de viaje  $\Delta t$ , es igual a la penalización en unidades de tiempo  $d^*$  (en Figura 33).

Esto es, el punto óptimo de reducción del espacio viario al vehículo privado, con el cual este internaliza sus costes marginales sociales mediante una penalización en unidades de tiempo agregada a su tiempo de viaje, es logrado cuando  $\Delta t = d^*$ .

Figura 34. La congestión y la reducción de la capacidad viaria al vehículo privado



Una reducción de la capacidad viaria para el vehículo privado ( $C$ ) en una vía determinada, genera una nueva curva de congestión para dicha vía, de manera que para un flujo de vehículos privados determinado ( $Q$ ) existe un nuevo tiempo de viaje ( $t$ ) mayor que el inicial. Se entiende que la capacidad viaria tiene valores discretos (número de carriles).

Fuente: González-Guzmán and Robusté (2011)

Ahora, desde la perspectiva de la teoría del flujo vehicular a partir del modelo lineal de B.D. Greenshields, se aborda el método para llevar a cabo la reducción óptima de capacidad  $\Delta C$ , aplicada al vehículo privado.

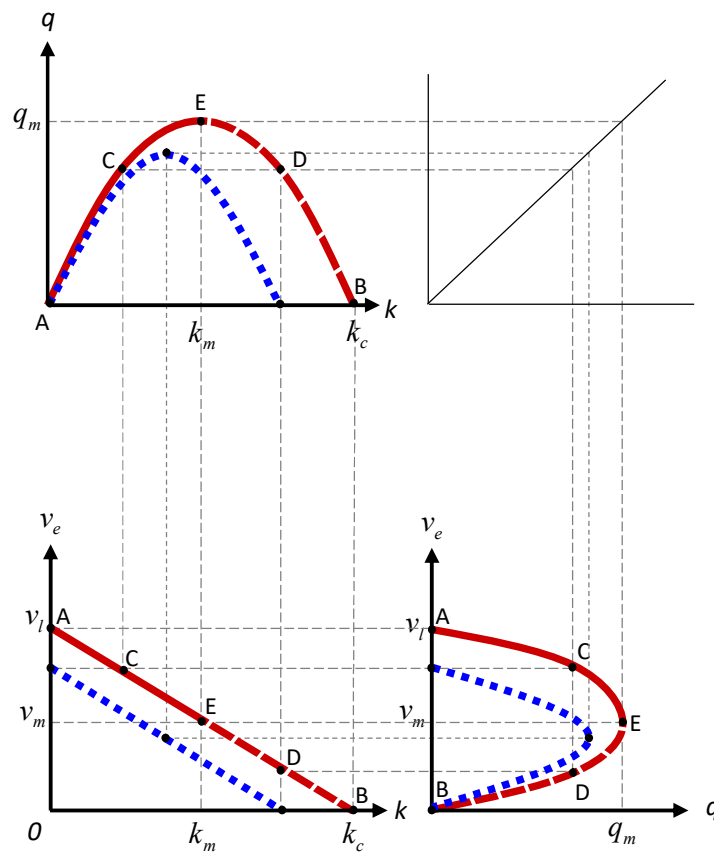
Cabe precisar que, en una formulación más reciente, Li and Zhang (2011), se postuló una nueva estructura para el diagrama fundamental de tráfico, lo concerniente a la relación entre flujo y densidad. Sin embargo, para efectos prácticos, en el presente apartado se hará uso del diagrama fundamental de tráfico contenido en el “*Highway Capacity Manual – HCM*”, con base en el establecido en May (1990)

Así, en la Figura 35 aparecen las tres relaciones básicas (velocidad  $v$  – densidad  $k$ ; flujo  $q$  – densidad  $k$ ; velocidad  $v$  - flujo  $q$ ) en un solo diagrama fundamental. La figura muestra en principio, un sistema de diagramas correspondiente a una capacidad inicial  $C^0$  destinada al vehículo privado en una vía dada (correspondiente a la curva con trazo continuo –nos referimos aquí a la parte superior de la curva, dado que esta parte es la considerada para el presente análisis-), y se ha agregado posteriormente un nuevo sistema de diagramas (curva con trazo punteado –para el análisis solo consideramos la parte superior de la curva-) correspondiente a una capacidad futura  $C^1$ , menor que la anterior, es decir, con  $C^1 < C^0$ .

De manera práctica, de lo que se trataría en un escenario real, es a partir de la identificación de los  $n$  carriles destinados al vehículo privado en una vía dada, lo cual aquí es tomado como  $C^0$ , aplicar una reducción a estos  $n$  carriles mediante la transferencia a otros modos de transporte.

En el presente apartado, se hace énfasis en el cálculo del porcentaje de reducción del espacio viario destinado al vehículo privado, más que en el nuevo uso al cual será asignado dicho espacio, lo cual se tratará más adelante.

Figura 35. Diagrama fundamental de tráfico y reducción de capacidad viaria al vehículo privado



Fuente: Adaptado del Highway Capacity Manual HCM.

Partiendo de la expresión (1) que muestra la relación lineal entre la velocidad  $v$  y la densidad  $k$ ,

$$\bar{v}_e = v_l - \left(\frac{v_l}{k_c}\right) k \tag{1}$$

- donde,  $\bar{v}_e$ : velocidad media espacial (km/hora)
- $k$ : densidad (vehículo/km/carril o calzada)
- $v_l$ : velocidad media espacial a flujo libre (km/hora)
- $k_c$ : densidad de congestamiento (vehículo/km/carril o calzada)

**A)** Plantearse el sistema de diagramas para una vía con una capacidad inicial,  $C^0$ , dada:

- A partir de la toma de datos, mediante aforos y velocidades, los cuales arrojan pares  $(k, \bar{v}_e)$ , y aplicando el método de los mínimos cuadrados, se halla  $v_l$  y  $k_c$ , que son los parámetros del modelo lineal.
- Calcular el flujo máximo admisible  $q_m$  (o capacidad teórica de la vía),

$$q_m = \frac{v_l k_c}{4}$$

- Calcular los valores de la relación parabólica entre el flujo  $q$  y la densidad  $k$ ,

$$q = v_l k - \left(\frac{v_l}{k_c}\right) k^2$$

- Calcular los valores de la relación parabólica entre la velocidad  $v$  y el flujo  $q$ ,

$$\bar{v}_e = \frac{v_l}{2} \pm \sqrt{\frac{v_l^2 - 4\left(\frac{v_l}{k_c}\right)q}{2}} \quad (2)$$

Esta última expresión, representada en las Figura 36 (ver también la Figura 35), indica que entre la velocidad y el flujo existe una relación parabólica, donde para un valor determinado del flujo, hay asociados dos valores de la velocidad.

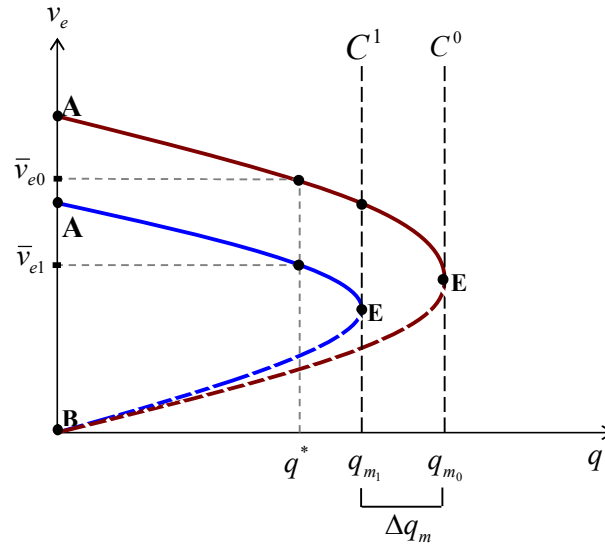
En la medida en que el flujo  $q$  aumenta, desde el punto  $A$  a velocidad a flujo libre, la velocidad progresivamente disminuye.

De manera que si para una determinada vialidad, el flujo de entrada  $q$ , se aproxima a la capacidad  $q_m$  (proyección del punto  $E$  sobre el eje horizontal), la dinámica del flujo vehicular puede causar que este se reduzca por debajo de la capacidad de la vía, con velocidades correspondientes a la parte inferior de la curva desde el punto  $E$  hasta el punto  $B$ .

Dicha precisión de la relación parabólica entre la velocidad y el flujo, se presenta aquí solo como explicación del modelo, pues para el presente análisis se considera solo la parte superior de la curva, con lo cual, para cada valor de flujo  $q$  existe un solo valor de velocidad  $v$ , de manera tal que la velocidad disminuye con el aumento del flujo.

**B)** Plantearse un nuevo sistema de diagramas para la vía según una capacidad futura asumida,  $C^1$ , (con  $C^1 < C^0$ ), como se muestra en la Figura 36 (ver también Figura 35).

Figura 36. Relación entre la velocidad y el flujo, y reducción de la capacidad viaria al vehículo privado



- Calcular las velocidades  $\bar{v}_{e0}$  y  $\bar{v}_{e1}$  usando la expresión (2), para un flujo óptimo  $q^*$ , las cuales corresponden a las capacidades inicial y futura,  $C^0$  y  $C^1$ . (Obsérvese que la velocidad  $\bar{v}_{e0}$ , corresponde al  $\bar{v}_e$  calculado en el apartado A).

- Calcular la variación (incremento) del tiempo de viaje  $\Delta t$ :

Conociendo las velocidades  $\bar{v}_{e0}$  y  $\bar{v}_{e1}$ , e involucrando la distancia de recorrido  $d$ , obtenemos los tiempos de viaje  $t_0$  y  $t_1$ , correspondientes a las capacidades  $C^0$  y  $C^1$ , y la diferencia de los tiempos de viaje  $t_0 - t_1$ , representa la variación del tiempo de viaje  $\Delta t$ . (Dado que  $\bar{v}_{e0} > \bar{v}_{e1}$ , entonces  $t_0 < t_1$ ).

$$\Delta t = |t_0 - t_1|$$

- C)** Cumplir la igualdad  $\Delta t = d^*$ , que confirma la optimalidad económica de  $\Delta C$ :

Contrastar el valor de  $\Delta t$  encontrado, con la penalización al vehículo privado expresada en unidades de tiempo  $d^*$  establecida con anterioridad, el valor de  $\Delta C$  asumido se irá ajustando hasta que se presente la igualdad buscada  $\Delta t = d^*$ .

El  $\Delta C$  que cumpla la igualdad  $\Delta t = d^*$ , será el SRC que se le aplica al vehículo privado en una vía dada.

El anterior desarrollo analítico a partir del modelo lineal de la teoría básica del flujo de tráfico, resulta útil para presentar la metodología implícita en el cálculo del SRC.

En la práctica se trabajará con un modelo simple de congestión: funciones de desempeño del arco, las cuales son descripciones matemáticas de la relación entre el tiempo de viaje y el volumen en el arco, que, aunque resulta un método burdo de

especificación de la congestión, resulta suficiente para casos como este en el que se pretende evaluar un modelo estático de oferta-demanda que permanece constante durante el día.

Mientras diversas formulaciones de tales funciones han sido sugeridas a través de los años (Branston, 1976; Davidson, 1966), las funciones BPR (BPR 1964) resultan muy apropiadas para el uso conjunto con modelos de asignación de tráfico.

La función BPR relaciona el tiempo de viaje en el arco como una función del ratio volumen/capacidad de acuerdo a:

$$t = t_f \left[ 1 + \alpha \left( \frac{v}{c} \right)^\beta \right]$$

donde,  $t$  : tiempo de viaje en el arco congestionado  
 $t_f$ : tiempo de viaje con velocidad a flujo libre  
 $v$ : volumen en el arco  
 $c$ : capacidad del arco

Con este modelo se calcula la congestión en los dos diferentes escenarios de capacidad viaria  $C^0$  y  $C^1$ . A pesar de que este modelo implica una simplificación burda en el cálculo de la congestión, resulta suficiente para los objetivos planteados en el presente documento.

#### 4.4 Las bases para la implementación del Road Space Retribution Charge by Congestion Costs (SRC)

Para implementar el *Road Space Retribution Charge by Congestion Costs (SRC)*, se requiere considerar dos aspectos principales: la unidad mínima de reducción y transferencia de espacio viario (en adelante denotada como MRTU), y la asignación de dicho espacio viario a otros modos de transporte de mayor eficiencia ambiental.

El primer aspecto, el referido a las unidades de reducción y transferencia de espacio viario, implica pasar del manejo de valores continuos (porcentajes) a valores discretos (número de carriles), dado que la reducción y transferencia de espacio viario se aplica a la sección de la vía, y esto se ha de expresar finalmente en número de carriles que serán reducidos de la capacidad total de la vía destinados al vehículo privado, y posteriormente transferidos a otros modos de transporte de mayor eficiencia ambiental.

Dado que cada uno de los carriles destinados al vehículo privado representa un porcentaje del total de carriles destinados a este, y que dicho porcentaje por carril destinado al vehículo privado es la unidad básica de reducción y transferencia de espacio viario (MRTU), el  $\Delta C$  óptimo (es decir, reducción del espacio viario destinado al vehículo privado hasta un punto óptimo en función de la internalización



de sus externalidades), deberá como mínimo tener un valor cercano al de 1 RTU (o MRTU), de manera que justifique su implementación.

Un  $\Delta C$  óptimo con un valor muy inferior al MRTU, indicará que la medida no puede ser implementada, dado que al reducir en un carril la capacidad viaria para el vehículo privado, se estará incurriendo en una elevada sobre tasación al vehículo privado, que no está justificada en el modelo microeconómico del SRC, el cual considera -al menos en principio- la congestión como la única externalidad a ser tasada. No obstante, aunque en el presente documento no es tratado en detalle, es posible para una específica alternativa de aplicación práctica del SRC, considerar otras externalidades adicionales en el modelo, como lo son la contaminación ambiental, el ruido y la accidentalidad entre otros; lo que haría que dicha sobre tasación al vehículo privado, sea disminuida hasta valores más acordes con el objetivo de internalizar las externalidades.

El segundo aspecto, implica tener una serie de criterios para la asignación de dicho espacio viario a los otros modos de transporte. Los aspectos a considerar involucran, en principio, la relación entre la oferta y la demanda de espacio viario para los otros modos de transporte en dicho eje viario, y las actividades (usos del suelo) localizadas sobre este. De esta manera podemos establecer, la idoneidad de transferir espacio para implantar un carril-bus, una vía para tranvía, un carril-bici, o la ampliación de aceras para peatones, o una mezcla de las anteriores si fuera el caso (otra opción es plantearse la posibilidad de implantar carril multiuso).

## **4.5 Un ejemplo numérico: Road Space Retribution Charge by Congestion Costs (SRC) en un corredor urbano congestionado**

### **4.5.1 Introducción**

Este apartado contiene dos ejemplos de aplicación numérica para el caso simple de dos rutas, en el marco de la aplicación del SRC en un corredor urbano congestionado. Un primer ejemplo bajo un enfoque analítico basado en los modelos de oferta-demanda de la microeconomía aplicada, y un segundo ejemplo bajo un enfoque de simulación basado en modelos de asignación de tráfico a una red.

El ejemplo con enfoque analítico busca demostrar mediante un modelo estático de oferta-demanda una equivalencia entre el road pricing estándar y el SRC en lo que respecta a su potencial efecto en la reducción de la demanda de viajes en vehículo privado localizada en el corredor sobre el cual se aplica el instrumento de regulación SRC. El ejemplo con enfoque de simulación pretende estimar la re-asignación de tráfico en la red como producto de la decisión del conductor ante un escenario en el cual su ruta habitual experimenta una reducción de espacio viario y presenta dos rutas alternativas competitivas, y entre las cuales debe elegir la opción con menor tiempo de viaje. Ambos, de manera independiente pretenden demostrar que la

implementación del SRC genera una mejora de la movilidad en contraste con el escenario de no regulación.

El objeto de ambos enfoques es, por tanto, estimar la reducción de tráfico en el corredor regulado, sin llegar a establecer qué sucede con los viajes en vehículo privado que desaparecen de dicho corredor. Es decir, si estos han optado por otras rutas alternativas, si han cambiado de modo de transporte pasándose por ejemplo al transporte público, si han modificado su hora del viaje, o si han desistido de realizarlo.

#### ***4.5.2 El caso simple de dos rutas - Enfoque analítico***

Un primer ejemplo para el caso simple de dos rutas es desarrollado, el cual considera un arco congestionado (donde el instrumento de regulación será implementado) para viajar entre un par origen-destino A-B, y otras alternativas (ruta, modo) para viajar entre el mismo par origen-destino.

Cuatro premisas básicas:

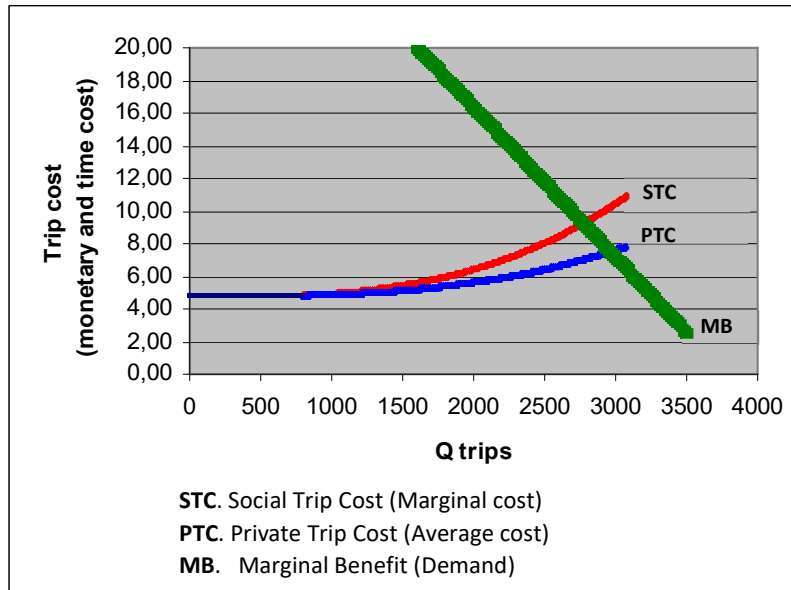
- (a) Un corredor cogestionado (arco 1).
- (b) Costo y tiempo fijos para no usuarios.
- (c) Utilidad lineal.
- (d) No redistribución directa del recaudo.

Otros aspectos a tener en consideración:

- (e) La vía congestionada identificada como “arco 1” para viajar entre un par origen-destino A-B, es clasificada como vía urbana clase III -de acuerdo al Highway Capacity Manual 2000 (TRB 2000)-, con las siguientes características: longitud 10 km, velocidad a flujo libre 55 km/hora, 4 carriles por sentido, y una capacidad de 2 960 vehículos/hora/por sentido (para un nivel de servicio D).
- (f) Un coste monetario del viaje en vehículo privado de 0.325 euros por km, y un coste de oportunidad del tiempo de viaje de 0.14 euros por minuto, es decir, 8.4 euros/hora (valores derivados de UPC y UB, 2000)

Considerando primero el lado de la demanda en el mercado del transporte urbano, la Figura 37 muestra la curva de demanda de viajes a través del arco 1 para una oferta viaria inicial (4 carriles). El eje horizontal mide el número de vehículos privado/hora/sentido. El eje vertical mide el coste de los viajes pendulares (commuting trips), la suma de los costes de tiempo y los costes monetarios de un viaje de 10 km. La curva de demanda muestra, para cada costo de viaje, cuantos viajeros están dispuestos a usar el arco 1. La curva de demanda es una curva de beneficio marginal: para cada volumen de tráfico, esta muestra cuanto está dispuesto a pagar el usuario marginal por viajar en el arco 1.

Figura 37. Costo del viaje en el arco 1 con una oferta viaria inicial (4 carriles)



*El volumen de vehículos privados de equilibrio 2960 (dado por la intersección de las curvas costo privado y demanda) excede al volumen óptimo 2773 (dado por la intersección de las curvas costo social y demanda) porque el conductor ignora los costes externos de su viaje, lo que hace necesarios instrumentos de regulación que los internalicen. En el caso particular de un instrumento de tipo espacial como la reducción de espacio viario se debe tener en cuenta además que el tiempo de viaje final en el óptimo será calculado en el nuevo escenario generado con la reducción de capacidad.*

Fuente: *González-Guzmán and Robusté (2011)*

La Tabla 9 muestra la relación entre volumen de tráfico (o cantidad de viajes) y tiempo de viaje, costo de viaje y penalización teórica en unidades de tiempo para el arco 1 con una oferta viaria inicial (4 carriles).

- La columna B contiene el tiempo de viaje (el tiempo de viaje por conductor) para diferentes volúmenes de tráfico. Para volúmenes hasta 800 vehículos por hora (para los 4 carriles), no hay congestión: cada uno viaja a la velocidad legal límite de 55 km por hora, y el viaje de 10 km se realiza en 10.91 minutos. Para tráficos superiores a 800 vehículos/hora, el computo del tiempo de viaje se basa en curvas BPR (con parámetros:  $\alpha = 1.8$  y  $\beta = 3.0$ ).
- La columna C muestra el efecto que el conductor marginal genera sobre los tiempos de viaje de los otros conductores. Para volúmenes de tráfico bajos (menores a 800 vehículos/hora), un conductor adicional no afecta la velocidad o los tiempos de viaje de los otros conductores. En cambio, para volúmenes superiores a 800 vehículos/hora, un conductor adicional ralentiza el tráfico y aumenta el tiempo de viaje de todos los usuarios.

- El incremento total en tiempo de viaje (columna D) es simplemente el tiempo extra por conductor multiplicado por el número total de los otros conductores. Esto es la externalidad por congestión: el usuario marginal ralentiza el tráfico e incrementa los tiempos de viaje, forzando a todos los usuarios a gastar más tiempo en la vía.
- El coste externo del viaje (columna E) es igual al valor monetario de la externalidad por congestión. Los valores en la columna E están basados en el supuesto de que el coste de oportunidad del tiempo de viaje es 0.14 euros por minuto.
- El coste privado del viaje (columna F) es el coste en el que incurre el usuario por realizar el viaje, definido como la suma del coste monetario y el coste en tiempo de viaje.
- El coste social del viaje (columna G) es la suma del coste privado (columna F) y el coste externo del viaje (columna E).

La Tabla 9 (ver también Figura 37), muestra dos niveles de tráfico de referencia para el arco 1. En primer lugar, muestra un nivel de tráfico de equilibrio de 2 960 vehículos por hora (con un tiempo de viaje de 30.55 minutos), que es el nivel de tráfico que se produce sin instrumentos de regulación dado que los usuarios del arco 1 no internalizan los costes que generan a otros usuarios, es decir, donde el beneficio marginal –mostrado por la curva de demanda- es igual al coste privado del viaje (7.53 euros). En segundo lugar, muestra un nivel de tráfico óptimo de 2 773 vehículos por hora (con un tiempo de viaje de 27.05 minutos), que solo puede ser alcanzado si se usan instrumentos de regulación que obliguen a los usuarios del arco 1 a asumir los costos que generan en los otros usuarios, es decir, donde el beneficio marginal es igual al coste social del viaje (9.24 euros).

La Tabla 9 muestra también para el escenario inicial, la penalización de tiempo teórica (15.76 minutos) que se debería implementar para generar una reducción del tráfico desde un volumen de tráfico de equilibrio (2 960 vehículos) hasta un volumen de tráfico óptimo (2 773 vehículos) y alcanzar así un tiempo de viaje provisional de 42,81 minutos –que incluye la penalización de tiempo teórica-.

El tiempo de viaje provisional del escenario inicial (columna J) será posteriormente contrastado con el tiempo de viaje del escenario final (columna K), calculado con la nueva curva de congestión BPR del arco 1 una vez se le ha efectuado la reducción de espacio viario al vehículo privado (capacidad de 2 220 vehículos/hora/sentido) como lo muestra la Tabla 10.

Tabla 9. Arco 1 con oferta viaria inicial (4 carriles): Volumen de tráfico, tiempo de penalización teórico y tiempo de viaje provisional

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Traffic Volume	Trip time Urban road with 4 lanes -BPR 1-	Increase in travel time per driver	Increase in total travel time	External trip cost or optimal tax $\tau^*$	Private trip cost	Social trip cost	Marginal benefit	Theoretical penalty time	Provisional trip time with theoretical penalty time (B + I)
vehicles	minutes	minutes	minutes	euro	euro	euro	euro	minutes	minutes
200	10.91	0.000	0.00	0.00	4.78	4.78	32.92	0.00	10.91
400	10.91	0.000	0.00	0.00	4.78	4.78	31.08	0.00	10.91
600	10.91	0.000	0.00	0.00	4.78	4.78	29.24	0.00	10.91
800	10.91	0.000	0.00	0.00	4.78	4.78	27.40	0.00	10.91
1000	11.67	0.002	0.37	0.05	4.88	4.94	25.56	0.37	12.04
1200	12.22	0.003	0.92	0.13	4.96	5.09	23.72	0.92	13.14
1400	12.99	0.004	1.69	0.24	5.07	5.30	21.88	1.69	14.68
1600	14.01	0.006	2.71	0.38	5.21	5.59	20.04	2.71	16.72
1800	15.32	0.007	4.03	0.56	5.40	5.96	18.20	4.03	19.35
2000	16.97	0.009	5.67	0.79	5.63	6.42	16.36	5.67	22.64
2200	18.97	0.011	7.67	1.07	5.91	6.98	14.52	7.67	26.65
2400	21.38	0.013	10.08	1.41	6.24	7.65	12.68	10.08	31.46
2600	24.22	0.015	12.92	1.81	6.64	8.45	10.84	12.92	37.14
<b>2773</b>	<b>27.05</b>	<b>0.017</b>	<b>15.76</b>	<b>2.21</b>	<b>7.04</b>	<b>9.24</b>	<b>9.24</b>	<b>15.76</b>	<b>42.81</b>
2800	27.53	0.018	16.23	2.27	7.10	9.38	9.00	16.23	43.76
<b>2960</b>	<b>30.55</b>	<b>0.020</b>	<b>19.25</b>	<b>2.69</b>	<b>7.53</b>	<b>10.22</b>	<b>7.53</b>	<b>19.25</b>	<b>49.79</b>
3000	31.35	0.020	20.06	2.81	7.64	10.45	7.16	20.06	51.41
3200	35.72	0.023	24.42	3.42	8.25	11.67	5.32	24.42	60.14
3400	40.67	0.026	29.37	4.11	8.94	13.06	3.48	29.37	70.04
3600	46.24	0.029	34.94	4.84	9.72	14.61	1.64	34.94	81.17

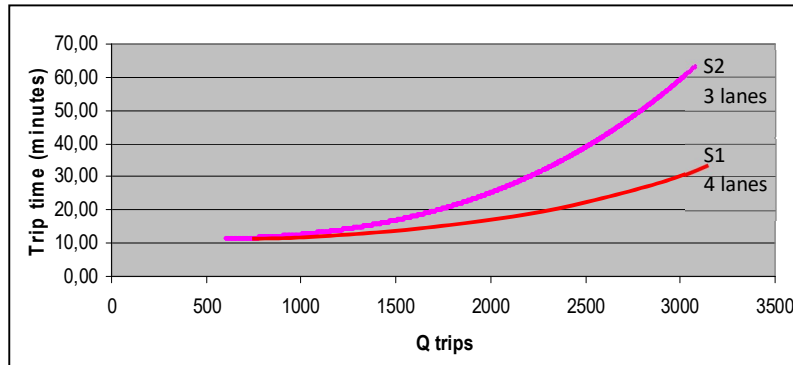
*En el escenario inicial con una oferta de espacio viario de 4 carriles, se puede presentar una reducción del volumen de vehículos privados de 2960 a 2773 vehículos/hora/sentido si el coste se incrementa de 7.53 euros a 9.24 euros. Dicha reducción podría ser lograda con una "hipotética" reducción del espacio viario para el mismo escenario, basada en un tiempo de penalización "teórico" de 15.76 minutos, incrementándose el tiempo de viaje desde uno inicial de 30.55 a uno "provisional" de 42.81 minutos.*

Fuente: *González-Guzmán and Robusté (2011)*

Dado que se trata de un caso simple de dos rutas, la penalización se aplica en un solo arco (arco 1), y la oferta de espacio viario ( $n$ ) presenta valores discretos, es decir, se expresa en número de carriles (para el arco 1,  $n=4$ ).

La mínima reducción y transferencia de espacio viario será entonces 1 carril (es decir, MRTU=25%), con lo cual se trata de evaluar el efecto que produciría en la red, la reducción de 1 carril de la oferta destinada al vehículo privado ( $n-1=3$ ) en el arco 1. (Ver Figura 38 y Tabla 10).

Figura 38. Curvas de congestión para el arco 1 con oferta viaria inicial y final al vehículo privado



Una reducción de la capacidad viaria para el vehículo privado implica pasar de la curva de congestión S1 a la curva de congestión S2, de manera que para un volumen óptimo de 2773 hay un tiempo de viaje final de 49.18 minutos (superior al tiempo de viaje provisional de 42.81 minutos calculado para el escenario de S1).

Tabla 10. Arco 1 con oferta viaria final (3 carriles): Volumen de tráfico, tiempo de viaje y penalización real en tiempo de viaje

A	K	L	M
Traffic Volume	Trip time. Urban road with 3 lanes -BPR 2-	Real penalty time (K-B)	Overcharge in penalty time (K*100/J)
vehicles	minutes	minutes	%
200	10.92	0.01	0.13
400	11.02	0.11	1.05
600	11.30	0.39	3.55
800	11.83	0.92	8.42
1000	12.70	1.04	5.55
1200	14.01	1.79	6.64
1400	15.83	2.85	7.88
1600	18.26	4.25	9.19
1800	21.38	6.05	10.45
2000	25.27	8.30	11.62
2200	30.02	11.05	12.66
2400	35.72	14.34	13.56
2600	42.45	18.24	14.32
<b>* 2773</b>	<b>49.18</b>	<b>22.12</b>	<b>14.87</b>
2800	50.31	22.78	14.95
2960	57.45	26.91	15.38
3000	59.37	28.01	15.48
3200	69.72	34.00	15.92
3400	81.45	40.78	16.29
3600	94.64	48.41	16.60

En el escenario de la nueva oferta viaria al vehículo privado (3 carriles) para un volumen óptimo de 2773 hay un tiempo de viaje final de 49.18 minutos (superior al tiempo de viaje provisional de 42.81 minutos calculado para el escenario S1), con lo cual se presenta un tiempo de penalización real de 22.12 minutos, que significa en la práctica una sobre-penalización del 14.87% en el tiempo de viaje.

Fuente: *González-Guzmán and Robusté (2011)*

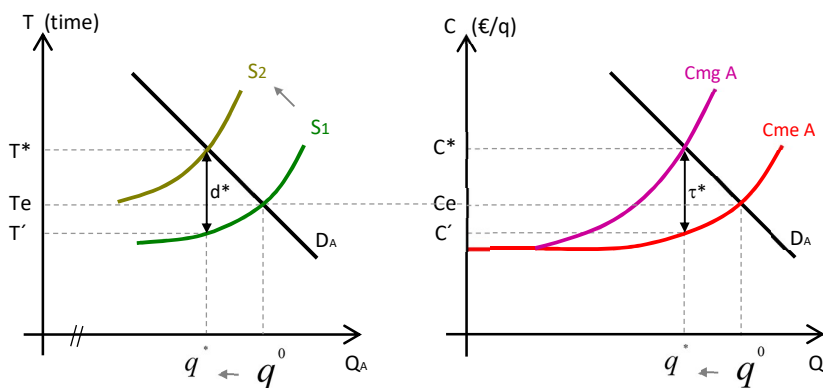
El tiempo de viaje con  $n-1$  en el arco 1 (columna K) sería de 49.18 minutos, esto implica una penalización real en tiempo de viaje (columna L) de 22.12 minutos, lo cual significa una sobre-penalización en tiempo de viaje del 14.87% (columna M). Se estima que una sobre penalización cercana al 15% (dado que la oferta viaria tiene valores discretos) es admisible dado que los usuarios que continúan en el arco 1 después de la medida podrían verse favorecidos en el mediano plazo por una reducción residual de la demanda más allá del óptimo calculado inicialmente.

Con ello es posible afirmar (para el caso aquí especificado y en circunstancias específicas) que una penalización en el tiempo de viaje en vehículo privado ( $d^*$ ) de 22.12 minutos realizada mediante una reducción del 25% de su espacio viario, tendría el mismo efecto que la aplicación de un peaje urbano basado en una tarifa óptima ( $\tau^*$ ) de 2.21 euros por trayecto, en lo que respecta a la reducción de la cantidad de viajes en vehículo privado ( $Q$ ) sobre un arco regulado, pasando así de 2 960 a 2 773 vehículos/hora/sentido.

Así, en tanto que ambos instrumentos, tasa óptima por congestión y SRC, pueden causar una reducción de la cantidad de viajes en vehículo privado similar, se pueden considerar equivalentes para tal fin.

Esta afirmación se considera válida teniendo en cuenta la naturaleza diferente de los dos instrumentos, (el primero monetario y el segundo espacial) a pesar de que no se trate aquí de una conversión directa de una tarifa monetaria óptima a una demora adicional en tiempo de viaje (mediante reducción de espacio viario) a partir de un valor subjetivo del tiempo, sino de una aproximación de la reducción de la oferta viaria a partir de una tasa óptima por congestión. En general, la implementación del SCR implica una ventaja sobre el escenario de no regulación (uncontrolled user equilibrium), y en este sentido cumple con su condición de instrumento de gestión de la movilidad urbana.

Figura 39. El tiempo de viaje y la tarifa óptima en la reducción de viajes en vehículo privado



*Una reducción de la cantidad de viajes en vehículo privado ( $Q$ ) puede ser lograda mediante una penalización monetaria o tarifa óptima ( $\tau^*$ ) que internalice los costes externos del viaje o mediante una penalización en tiempo de viaje ( $d^*$ ) equivalente generada por una reducción de*

*oferta viaria al vehículo privado. Por tratarse de una medida de regulación espacial, la penalización en tiempo de viaje ( $d^*$ ) para una cantidad de viajes óptima ( $q^*$ ) debe incluir tanto el coste externo del viaje (coste marginal) en unidades de tiempo para la oferta viaria inicial ( $S1$ ) como la demora adicional generada por la reducción de la capacidad viaria de una oferta viaria inicial ( $S1$ ) a una oferta viaria final ( $S2$ ). Dado que ambos instrumentos, bajo circunstancias específicas, pueden causar una reducción de la cantidad de viajes en vehículo privado similar, se pueden considerar equivalentes para tal fin.*

Fuente: *González-Guzmán and Robusté (2011)*

### **4.5.3 El caso simple de dos rutas - Enfoque de simulación**

Por su parte el ejemplo numérico aplicado al caso simple de dos rutas bajo un enfoque de simulación se realiza con el soporte de un software especializado (Transcad 4.5), usando el *User Equilibrium (UE)* como método de asignación de tráfico en la red.

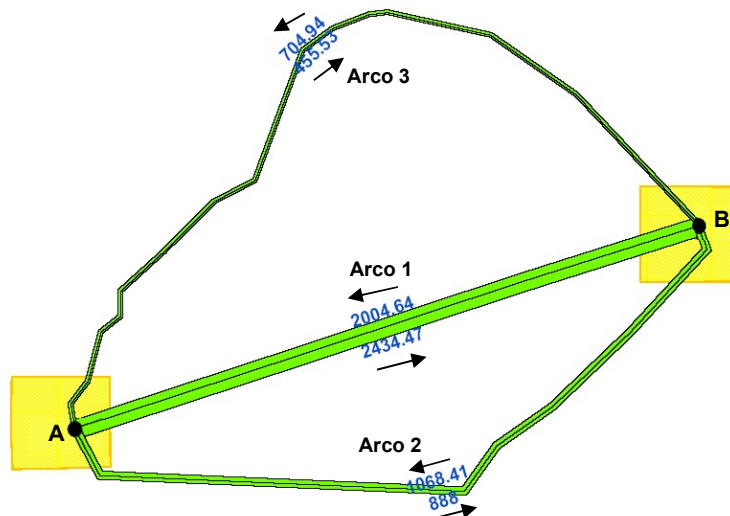
Con el fin de analizar la re-asignación en la red a partir de la aplicación del SRC en el arco 1 (arco en el cual se implementada la medida), consideraremos cinco supuestos adicionales (c-g) a los dos inicialmente planteados (a, b):

- (a) Una vía congestionado identificada como “arco 1” para viajar entre un par origen-destino A-B, clasificada como vía urbana clase III (según HCM 2000), con las siguientes características: longitud 10 km, velocidad a flujo libre 55 km/hora, 4 carriles por sentido, y una capacidad de 2 960 vehículos/hora/por sentido (para un nivel de servicio D).
- (b) Un coste monetario del viaje en vehículo privado de 0.325 euros por km, y un coste de oportunidad del tiempo de viaje de 0.14 euros por minuto (8.4 euros/hora).
- (c) El arco 1 dirección A-B: longitud 10 km, velocidad a flujo libre 55 km/hora, 4 carriles, y una capacidad de 2 960 vehículos/hora (para un nivel de servicio D).
- (d) El arco 1 dirección B-A, longitud 10 km, velocidad a flujo libre 55 km/hora, 3 carriles, y una capacidad de 2 220 vehículos/hora (para un nivel de servicio D).
- (e) Dos vías alternativas identificadas como “arco 2” y “arco 3” para viajar entre el mismo par origen-destino A-B, clasificadas como vías urbanas clase I (según HCM 2000). Estos arcos alternativos bidireccionales (A-B, B-A) presentan las siguientes características: para el “arco 2”, longitud 11.98 km, velocidad a flujo libre 80 km/hora, 4 carriles en cada sentido; y para el “arco 3” longitud 14.48 km, velocidad a flujo libre 80 km/hora, 4 carriles en cada sentido. Para ambos arcos se ha considerado una capacidad de 3 750 vehículos/hora/sentido (para un nivel de servicio D).
- (f) Una matriz de viajes totales de 7 556 viajes (3 778 viajes en cada sentido).



- (g) Una precarga (preload) de 2 650 viajes por sentido tanto para el arco 2 como para el arco 3.

Figura 40. Re-asignación del tráfico en la red con SRC en el arco 1



La Figura 39, la Tabla 10 y la Tabla 12, nos permiten ver de manera simultánea el resultado de dos escenarios diferentes. Un primer escenario en el cual los tres arcos tienen 4 carriles (expresado en el sentido A-B), y un segundo escenario donde al arco 1 se le ha reducido 1 carril (expresado en el sentido B-A). Esto nos permite realizar comparaciones entre el escenario inicial sin regulación y un escenario final con la aplicación de la medida de regulación.

La Tabla 11 y la Tabla 12 (y la Figura 39) muestra que realizando una primera asignación de 3 778 viajes en el sentido A-B, después de 9 iteraciones resultan 2 434 viajes en el arco 1 (64.5% del total de viajes asignado), 888 viajes en el arco 2 (23.5%), y 455 viajes en el arco 3 (12.1%). En la Figura 39 se muestra la asignación resultante en cada arco incluyendo en el cálculo las precarga (preloads) de 2 650 viajes por sentido tanto para el arco 1 como para el arco 2, pero estas no están representadas ni en la Figura 39 ni en la Tabla 11 y Tabla 12, por tanto al flujo resultante es necesario sumar la precarga, resultando 3 538 viajes para el arco 2 y 3 718 para viajes para el arco 3. Todos los arcos considerados se mantienen dentro del nivel de servicio D.

Aplicando el SRC en el arco 1 (que en este caso significa reducir un carril en el arco 1), podemos realizar una segunda asignación de 3 778 viajes en el sentido B-A, que después de 9 iteraciones da como resultado 2 004 viajes en el arco 1 (53.1%), 1 068 viajes en el arco 2 (28.4%), y 704 en el arco 3 (18.7%). Sumando la precarga,

serán 3 718 viajes en el arco 2, y 3 355 en el arco 3. Todos los arcos considerados se mantienen dentro del nivel de servicio D.

Estos resultados muestran que con la aplicación del SRC en el arco 1, se produce una reducción de usuarios en el arco 1 del 17.63%, un incremento de usuarios en el arco 2 de 20.43%, y un incremento de usuarios del arco 3 del 54.5%. En cuanto al tiempo de viaje, el arco 1 experimenta un aumento del tiempo de viaje del 12.8% (pasa de 21.9 a 24.7 minutos), el arco 2 un aumento del 8.8% (pasa de 22.6 a 24.6 minutos), y el arco 3 un aumento del 14.17% (pasa de 21.8 a 24.8 minutos).

Lo anterior quiere decir, que con la aplicación del SRC en el arco 1, se fomenta un mayor uso de los arcos alternativos 2 y 3, a la vez que como respuesta a la aplicación de la medida la penalización real en tiempo de viaje al usuario del vehículo privado en el arco 1 es solo del 12.8%, con la cual se logra una reducción de usuarios del 17.63%.

Tabla 11. Re-asignación del tráfico en la red con SRC en el arco 1

Arco	Length (km)	Number of lanes A-B	Number of lanes B-A	Free flow speed A-B	Free flow speed B-A	Capacity A-B	Capacity B-A	Trip time with free flow A-B	Trip time with free flow B-A	Preload A-B	Preload B-A
1	10.00	4	3	55	55	2 960	2 260	10.91	10.91	--	--
2	11.98	4	4	80	80	3 750	3 750	8.99	8.99	2 650	2 650
3	14.48	4	4	80	80	3 750	3 750	10.86	10.86	2 650	2 650

Tabla 12. Re-asignación del tráfico en la red con SRC en el arco 1

Arco	Flow A-B	Flow B-A	Total flow	Trip time A-B	Trip time B-A	Speed A-B	Speed B-A
1	2 434.4730	2 004.6415	4 439.1145	21.9796	24.7959	27.3093	24.2075
2	887.9984	1 068.4144	1 956.4128	22.6246	24.6160	31.7720	29.2017
3	455.5286	704.9441	1 160.4727	21.8070	24.8966	39.8305	34.8877

Realizando otras simulaciones para estos dos escenarios, pero ahora aumentando la precarga de los arcos alternativos a 3 000, 3 100 y 3 650 usuarios por sentido, el porcentaje de reducción de usuarios en el arco 1 se mantiene en torno al 17%, y la penalización real en tiempo de viaje al usuario del vehículo privado en el arco 1 es del 15, 16 y 19% respectivamente.

Por otra parte, una precarga de 3 000 usuarios en los arcos alternativos, produce que se exceda la capacidad para el nivel de servicio D en el arco 2, la precarga de 3 100 genera este mismo efecto en el arco 2, y la precarga de 3 650 genera este mismo efecto en todos los arcos.

En los ejemplos numéricos para el caso simple de dos rutas, tanto en el de enfoque analítico como en el de simulación, se evidencia una reducción del tráfico, es decir, una disminución de la demanda de viajes en vehículo privado localizada sobre el corredor en el cual se ha implementado un esquema de regulación con el instrumento SRC. Cabe anotar que la diferencia que presentan los dos ejemplos en lo que respecta a los porcentajes de reducción de dicha demanda localizada, obedece a la diferente naturaleza de los dos enfoques abordados.

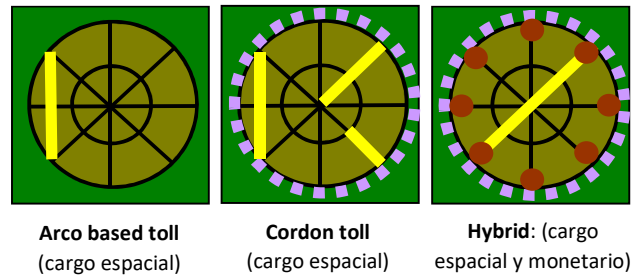
Por otra parte, cabe anotar que dichos resultados en la reducción de la demanda localizada pueden variar significativamente cuando se incorpore en el análisis el nuevo uso que se le da al espacio viario tomado del vehículo privado (aspecto no considerado en estos ejemplos y que se propone como futuras extensiones de la presente investigación).

Es decir, si dicho espacio ha sido destinado, por ejemplo, a un carril bus o a una ampliación de aceras, entran a jugar las elasticidades cruzadas entre alternativas competitivas, como es el caso del transporte público como substitutivo del vehículo privado en viajes que, por su longitud, necesitan un modo de transporte motorizado.

#### 4.6 Alternativas de aplicación práctica del Road Space Retribution Charge by Congestion Costs (SRC)

La aplicación práctica de la Road Space Retribution Charge by Congestion Costs (SRC) presenta varias alternativas, las cuales son enunciadas aquí exponiendo de manera inicial, las condiciones en las cuales puede ser recomendada su aplicación.

Figura 41. Alternativas para la aplicación práctica del SRC

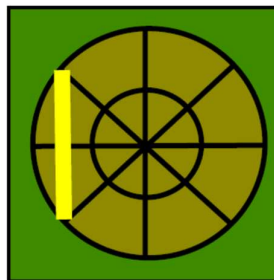


Fuente: *González-Guzmán and Robusté (2011)*

##### 4.6.1 SRC en un corredor urbano congestionado

Esta primera alternativa trata la aplicación del SRC en un corredor urbano con presencia de congestión y el cual ha sido identificado como una arteria de carácter estratégico para la movilidad de la ciudad. Tal identificación implica por parte del sector público la decisión de, primero, darle mayor prioridad al transporte público y, segundo, mejorar el espacio viario para los modos de transporte no motorizados.

Figura 42. SCR en corredor urbano congestionado (arco based toll)



En la práctica, se trata entonces de calcular la externalidad por congestión generada por el vehículo privado en dicha arteria urbana de manera que esta pueda ser posteriormente cargada, mediante la aplicación del SRC, a los usuarios del vehículo privado que pretendan seguir eligiendo dicho corredor para sus viajes.

Este tipo de aplicación requiere la existencia de un mínimo de 4 carriles por sentido en la arteria a intervenir. De otra manera, dado el carácter discreto que se le da aquí a la capacidad viaria (número de carriles), se produciría una exagerada sobre-penalización, lo cual distorsionaría la aplicación del modelo.

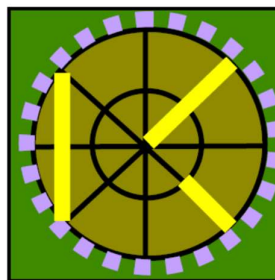
El objetivo de este tipo de implementación no es una eliminación total o una reducción substancial de la congestión en los carriles destinados al vehículo privado. Por el contrario, el éxito de la implementación radica en el hecho de que los conductores que usan el corredor experimenten cierto nivel de congestión adicional, el cual, frente a una mejora substancial de los tiempos de viaje en transporte público al contar con carriles exclusivos, potencie un cambio modal del vehículo particular hacia el transporte público.

Este primer caso de aplicación es susceptible de utilizar el “first best” (o tarificación en función de costes marginales) como sistema de fijación de precios, al tratarse de un único arco como objeto de estudio, con lo cual se busca que los usuarios del vehículo privado asuman el total de sus costes marginales sociales. Cabe anotar que para el caso de redes más complejas ha de trabajarse con el “second best” como sistema de fijación de precios, para evitar inequidades en la tasación de los diversos arcos de la red.

#### **4.6.2 SRC en centro urbano**

Una segunda alternativa de aplicación práctica trata la implementación del SRC en una zona de regulación, en particular, el centro de la ciudad, dado que éste concentra los mayores niveles de congestión. En ámbitos como este el dar prioridad al transporte público y los modos no motorizados es una tarea de gran interés para diversas administraciones locales.

Figura 43. SCR en centro urbano (cordon toll)



En este caso, a partir de un cordón que delimita la zona de regulación de la ciudad, se calcula su la externalidad por congestión generada por el vehículo particular. Posteriormente, dicha externalidad es cargada a los usuarios del vehículo privado mediante la aplicación del SRC en diversos corredores de la zona, previamente identificados como estratégicos, en función de las necesidades que cada uno de los corredores seleccionados plantee.

De esta manera, mientras en los corredores que albergan una mayor actividad comercial una ampliación de aceras para peatones resulta más conveniente, en otros corredores lo idóneo es crear prioridad para el transporte público (carril bus), o en itinerarios especiales proveer un carril-bici.

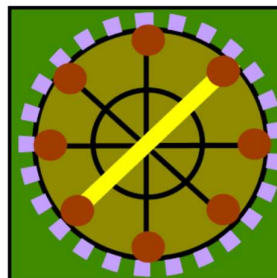
Así, el SRC podría ser expresado en metros o kilómetros lineales de carril exclusivo para cada uno de los modos de transporte, el cual puede ser materializado con diversas actuaciones en los arcos comprendidos en el área de estudio.

Una versión más compleja de esta segunda alternativa de aplicación puede involucrar adicionar diversas medidas de gestión de la movilidad relacionadas con regulación del tráfico (implementación de intersecciones con regulación semafórica o ajuste de las existentes para dar prioridad a peatones y ciclistas) y/o restricciones de circulación vehicular (a un porcentaje de los vehículos y en un periodo de tiempo establecido), de manera que dicho esquema híbrido espacio-regulatorio logre que el conductor internalice su externalidad por congestión.

#### ***4.6.3 SRC y road pricing en centro urbano***

Una tercera alternativa de aplicación tiene que ver con la posibilidad de realizar una aplicación híbrida espacio-monetaria en la cual la externalidad calculada para la zona de regulación (centro de la ciudad), sea cargada al usuario del vehículo privado, una parte en forma de cargo monetario (con road pricing electrónico) en los puntos de acceso de la misma, y otra parte en forma de cargo espacial (con SRC) sobre uno o varios corredores urbanos estratégicos en los cuales se evidencie la necesidad de rediseñar su sección viaria para dar prioridad al transporte público y los modos no motorizados.

Figura 44. SCR y road pricing en centro urbano (hybrid cordon toll)



Para este caso en concreto resultaría conveniente involucrar varias externalidades además de la congestión. Así, es posible abordar el tema ya no solo desde el concepto de la capacidad funcional de la vía sino desde la capacidad ambiental, como se postula en Ferrari (1995) y Yang & Bell (1997). Esta metodología redundaría en una tasa general más robusta, que resulte suficiente para: (i) desincentivar a una porción de usuarios de usar el vehículo

privado para acceder a la ciudad gracias a la aplicación del peaje monetario en los accesos y (ii) generar una más eficiente redistribución del tráfico de vehículo privado al interior de la ciudad y promover un cambio en la elección modal del vehículo particular hacia el transporte público gracias a la aplicación del cargo espacial sobre el corredor urbano identificado como estratégico.

Desde una perspectiva más amplia, las tres alternativas para la aplicación práctica del SRC planteadas aquí son esquemas básicos que pueden ser adaptados para ser implementados en diversas ciudades las cuales tengan un gran interés en afrontar el aspecto que aquí consideramos clave en la movilidad sostenible: una distribución modal más racional y eficiente uso del espacio viario urbano.

En lo que respecta a la primera alternativa de aplicación práctica “arco based toll”, el análisis de la aplicación teórica, el caso simple de dos rutas, muestra que la internalización de las externalidades generadas por el vehículo privado (en este caso la congestión de tráfico), llevada a cabo con medidas espaciales (gestión del uso del espacio viario), puede ser un eficiente instrumento para promover una movilidad más sostenible en entornos urbanos.

Lo anterior se establece en el contexto de tres objetivos específicos: disminuir el número de vehículos privados en el corredor regulado, hasta alcanzar un número óptimo; contribuir a una redistribución más balanceada del tráfico entre las diferentes opciones (arcos) para una par origen-destino dado; y simultáneamente favorecer el transporte público por medio de la designación de un carril exclusivo para el bus o el tranvía, generando ciertas condiciones en las cuales sea factible un fomento del cambio en la elección modal.

En lo que respecta a la segunda y la tercer alternativa de aplicación práctica del SRC: “cordon toll” y “hybrid cordon toll”, las cuales actúan sobre un área de regulación generalmente determinada por el centro de la ciudad, cabe anotar que se entiende que estas actuaciones están orientadas a reducir la demanda de viajes en vehículo particular en el mediano plazo en el ámbito de regulación, pero que requieren de medidas complementarias (otras estrategias TDM) de regulación de los tráficos pendulares de entrada y salida de la ciudad (cuando estos presentan niveles críticos), para lograr una reducción general en el conjunto de la ciudad de la demanda de viajes en vehículo privado.

Por último, en lo que respecta a la tercera alternativa de aplicación: “hybrid cordon toll” una aplicación híbrida de componente espacio-monetario en el centro de la ciudad, la cual en general concentra el mayor nivel de impacto de las externalidades, permitiría cargar las externalidades tanto por congestión de tráfico como por contaminación ambiental, de manera que el usuario del vehículo privado asuma los costes reales de su movilidad, y al internalizar la externalidad con un cargo en parte monetario y en parte espacial, la aceptación social sería más favorable (o menos reticente) pues no se trataría de un peaje monetario elevado que el ciudadano común pudiera considerar exagerado.

## 5 APLICACIÓN AL CASO DEL CENTRO HISTÓRICO DE CALI, COLOMBIA.

### 5.1 Introducción

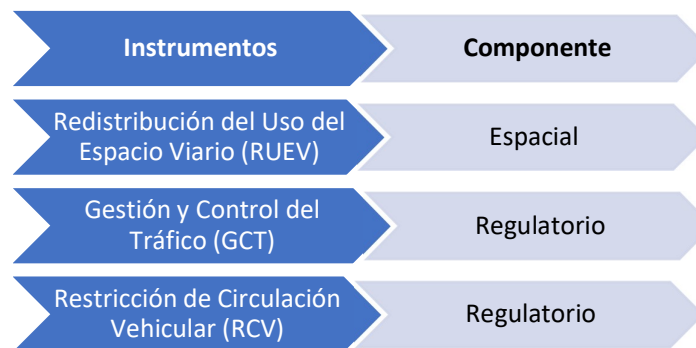
En este apartado se presenta una aplicación práctica del instrumento de gestión de la demanda de transporte denominado ‘Road Space Retribution Charge by Congestion (SRC)’ para el caso del Centro Histórico de la ciudad de Santiago de Cali (Colombia), con el cual se busca una transferencia de espacio viario de la calzada vehicular desde el transporte privado hacia el transporte público y los modos no motorizados (peatón y bicicleta), de manera que el vehículo particular internalice sus costos sociales asociados a la congestión.

Esta aplicación práctica realiza un desarrollo técnico de la segunda alternativa de aplicación práctica denominada “SRC en centro urbano” la cual fue presentada en el apartado 4.6 del presente documento.

En particular, se enfoca en una versión más compleja de dicha alternativa, en la cual se exploran esquemas híbridos de componente espacio-regulatorio, con el fin de que el vehículo particular internalice sus externalidades sociales.

Para ello en el análisis se involucran, además de la medida de redistribución del uso del espacio viario, otras medidas de gestión de la movilidad relacionadas con regulación del tráfico y/o restricciones de circulación vehicular.

Figura 45. Instrumentos considerados para esquemas híbridos espacio-regulatorios



Esta aplicación práctica para el caso del centro histórico de Santiago de Cali se plantea en el marco de lo establecido en la legislación nacional y normativa local vigente:

- La Ley Nacional 1083 de 2006 ‘Por medio de la cual se establecen algunas normas sobre planeación urbana y sostenible y se dictan otras disposiciones’, la cual establece en su artículo 1 la prelación a los modos de transporte no motorizados y los sistemas de transporte público.



- El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del Municipio de Santiago de Cali, adoptado mediante Acuerdo Municipal 0373 de 2014<sup>5</sup>, en el cual se establece un modelo de ordenamiento territorial donde se de “un mayor impulso al espacio público y al sistema de movilidad, donde se respete el peatón y tenga prioridad el transporte público ante el particular” (Artículo 1 – Visión del Plan de Ordenamiento Territorial).

De igual manera, se establece la “redistribución de la sección transversal de las vías” como instrumento que permite materializar la prioridad a los modos de transporte más sostenibles en el contexto de la ciudad consolidada (Artículo 208 – Subsistema vial, parágrafo 2).

- El Plan Especial de Manejo y Protección del Centro Histórico (PEMP Centro Histórico) del Municipio de Santiago de Cali, aprobado mediante Resolución 1810 de 2015<sup>6</sup>, el cual establece como objetivo el “promover una movilidad sostenible manteniendo un adecuado equilibrio entre los modos de desplazamiento y estimulando el disfrute peatonal del centro histórico” (Artículo 4 – Objetivos específicos, numeral 3 – urbanos).
- El Plan Integral de Movilidad Urbana (PIMU Visión 2030) del Municipio de Santiago de Cali, adoptado mediante Decreto Municipal 0332 de 2019<sup>7</sup>.

Entre sus principios incluye “1. El derecho de los ciudadanos a la accesibilidad territorial en el contexto de una movilidad sostenible, con seguridad vial y accesibilidad universal” y “2. La prioridad de los modos de transporte de menor costo social y ambiental (...)”. (Artículo 8 – Principios de las directrices generales de movilidad sostenible).

Entre sus objetivos incluye “4. Planificar la movilidad con base en la prioridad a los sistemas de transporte público optimizado y los modos no motorizados (peatón y bicicleta)”, “7. Reducir el uso generalizado e irracional del transporte privado mediante acciones de desincentivo” y “8. Internalizar en el costo de la movilidad en transporte privado las externalidades negativas que genera”. (Artículo 9 – Objetivos de las directrices generales de movilidad sostenible).

Entre sus programas se incluye “c) Programa: Redistribución del espacio vial en itinerarios de especial interés en el centro histórico” (Artículo 85 – Programas).

---

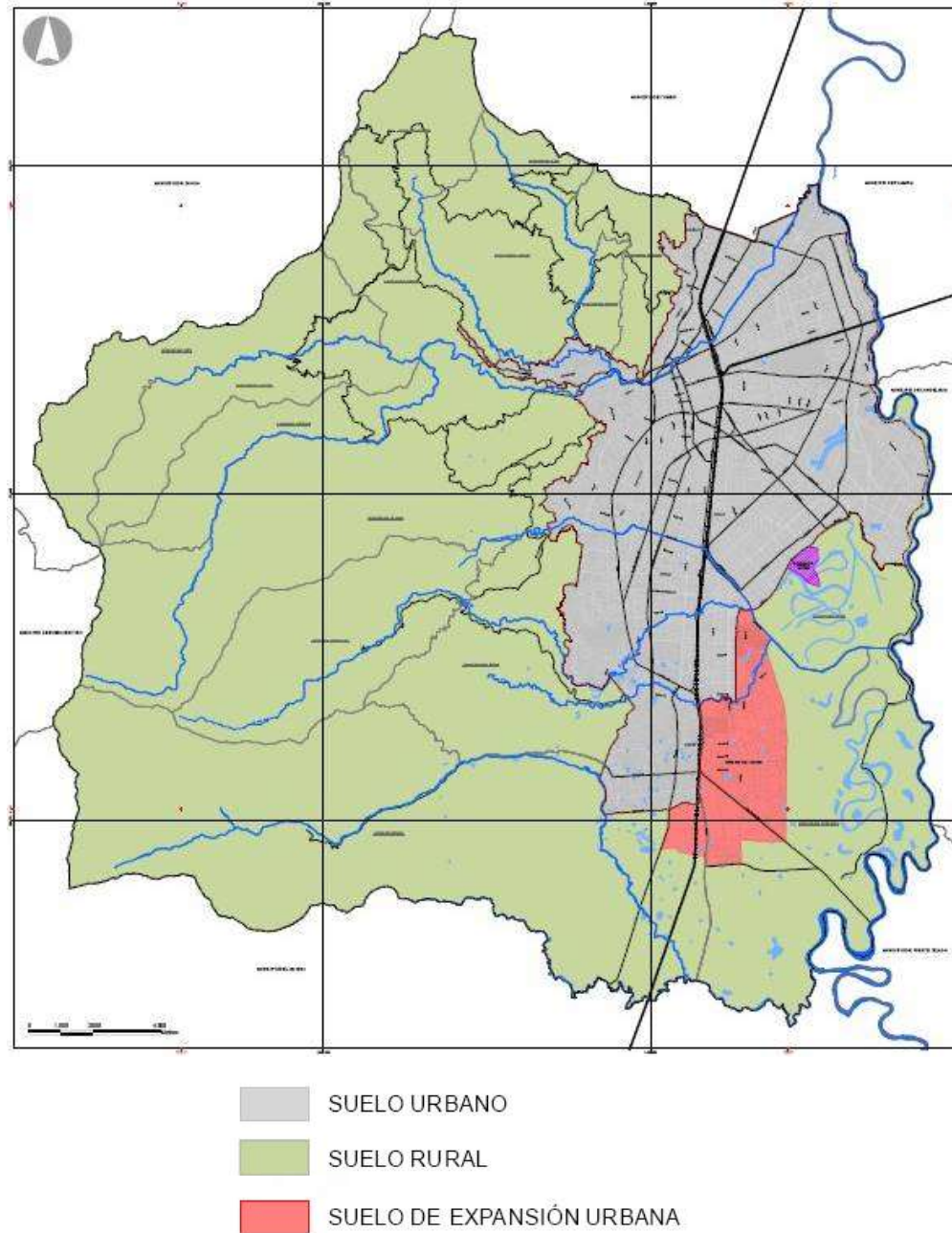
<sup>5</sup> Acuerdo 0373 de 2014 del Concejo de Santiago de Cali “Por medio del cual se adopta la revisión ordinaria de contenido de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Santiago de Cali.

<sup>6</sup> Resolución 1810 de 2015 del Ministerio de Cultura “Por la cual se aprueba el Plan Especial de Manejo y Protección del Centro Histórico del Municipio de Santiago de Cali y su zona de influencia, en el Departamento del Valle del Cauca, declarado monumento nacional, hoy bien de interés cultural del ámbito nacional”.

<sup>7</sup> Decreto Municipal 0332 de 2019 de la Alcaldía de Santiago de Cali “Por el cual se actualiza el Plan Integral de Movilidad Urbana de Santiago de Cali adoptado mediante 411.0.20.0615 de 2008, se incluye el Plan de Estacionamiento, y se establecen otras disposiciones”.

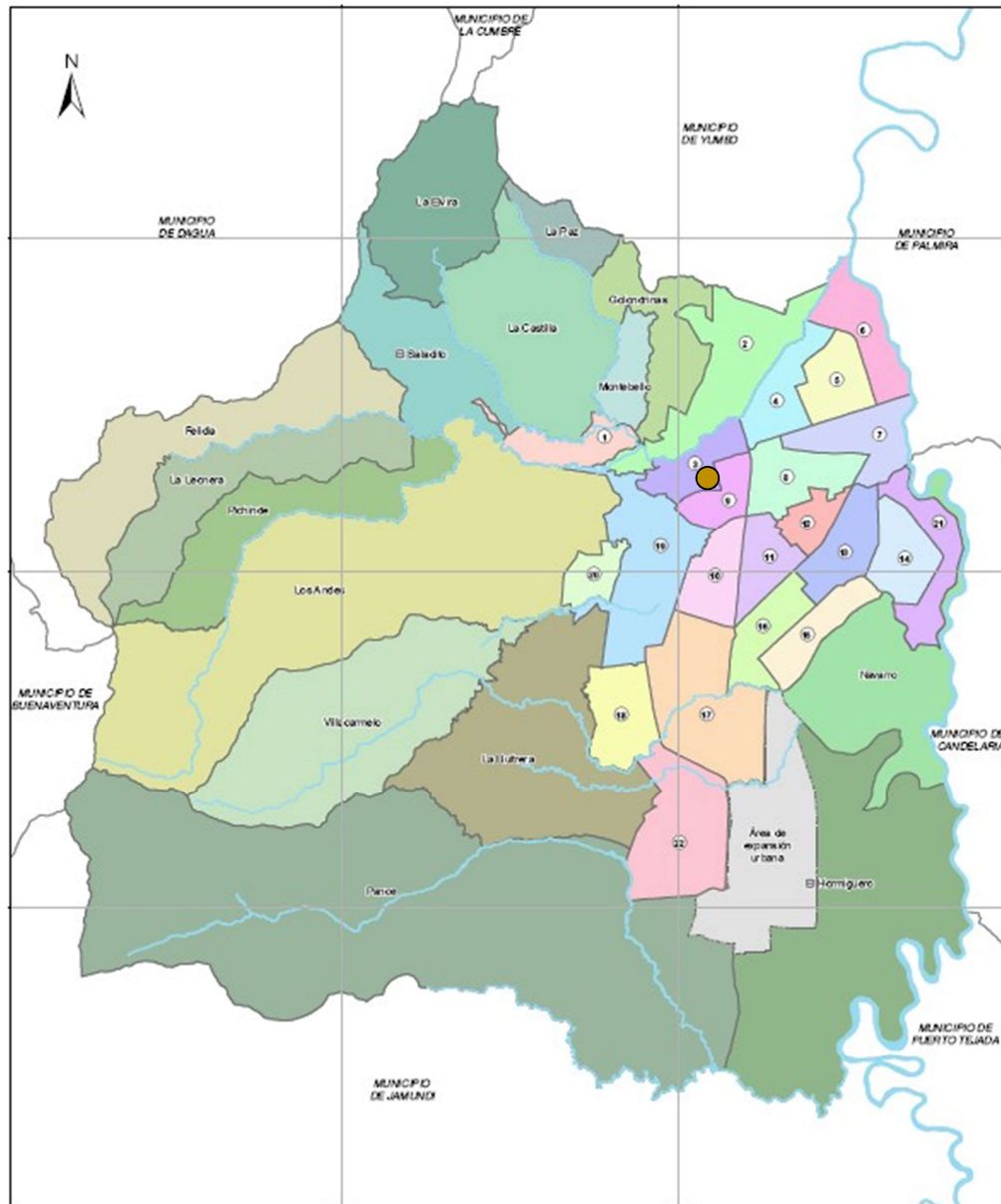


Figura 47. Clasificación del suelo en el Municipio de Santiago de Cali



Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2014)

Figura 48. División administrativa: Comunas del área urbana y Corregimientos del área rural



● Centro Histórico

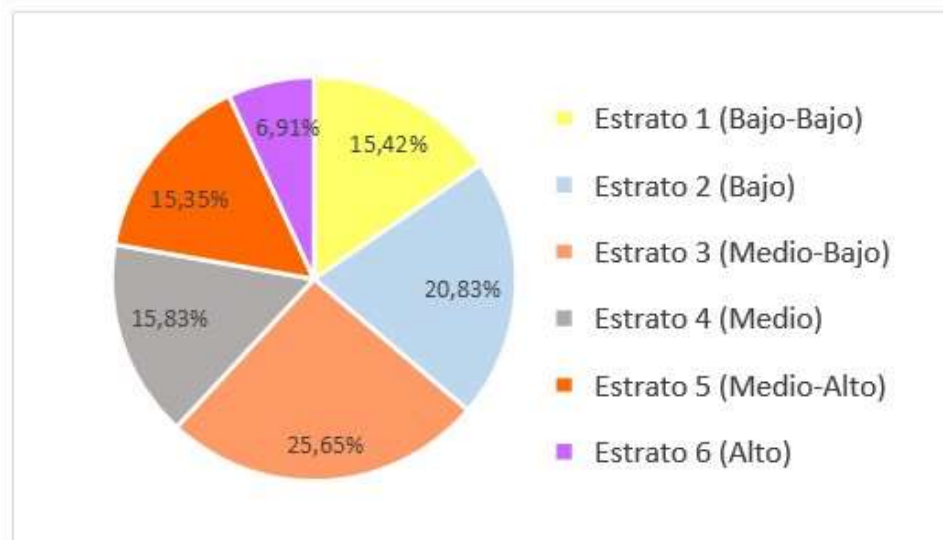
Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2018)

### 5.2.3 Población

El Municipio de Santiago de Cali con una población de 2,2 millones de habitantes (DANE, 2018) es el tercer municipio más poblado después de Bogotá y Medellín. Es un municipio predominantemente urbano, del total de la población, en el área urbana se localiza el 98,5% y en el área rural el 1,5%. (DANE, 2005) (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019a).

El municipio cuenta con un sistema de clasificación socio-económica de los inmuebles conocidos como “estratos socio-económicos”<sup>8</sup>, para el área urbana se establecen 6 categorías, la más baja es el estrato socio-económico 1 y la más alta es el estrato socio-económico 6. Del total de 612.902 viviendas, la distribución de estas según el estrato socio-económico muestra que el 61,9% pertenecen a los estratos 1, 2 y 3 (bajo-bajo, bajo y medio-bajo respectivamente), el 15,83% al estrato 4 (medio) y el 22,26% a los estratos 5 y 6 (medio-alto y alto respectivamente). (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019a).

Figura 49. Distribución de las viviendas en área urbana según estrato socio-económico



Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019a)

<sup>8</sup> En Colombia se usa un sistema de clasificación denominado Estratos Socio-Económicos, el cual clasifica las viviendas en 6 categorías o estratos, en las cuales el estrato 1 es el más bajo y el estrato 6 es el más alto. Dicha clasificación no se basa en los ingresos de las familias sino en las características físicas de la vivienda, su entorno inmediato y su contexto urbano. El estrato es entendido como un indicador indirecto que da idea del nivel socio-económico de una familia que habita en una calle en particular, indicador que es usado por los organismos de los gobiernos locales, regionales y nacionales con el propósito de recaudar impuesto, tarificación y subsidio de servicios públicos y para el desarrollo de los programas de asistencia social.

#### **5.2.4 Economía**

El Municipio de Santiago de Cali es el principal centro comercial y de servicios del sur-occidente de Colombia y la capital del Departamento del Valle del Cauca, el tercer centro económico del país. Se encuentran constituidas 4.603 sociedades, cuya actividad económica principal es servicios con un 30,9%, comercio con un 22,6%, construcción con un 11,9%, e industria con un 10,8%. (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019a).

El PIB per cápita del Municipio de Santiago de Cali es de USD 6.131 a precios corrientes (el cual está ligeramente por debajo del PIB per cápita nacional que es de USD 6.641). (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019a).

Los índices de pobreza y desigualdad para “Cali Área Metropolitana A.M.”<sup>9</sup> establecen una incidencia de la pobreza monetaria<sup>10</sup> del 15,7% (por debajo del promedio nacional que es 27%), una incidencia de la pobreza extrema<sup>11</sup> – indigencia- del 3,4% (por debajo del promedio nacional que es 7,2%) y un coeficiente de Gini de 0,46 (ligeramente mejor que el promedio nacional que es 0,51). (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019a), (DANE, 2018)

#### **5.2.5 Movilidad**

##### Tasa de motorización

La tasa de motorización general (que incluye vehículo particular y moto particular) en los últimos 17 años (2000 – 2016) ha tenido un crecimiento del 157%, en dicho período pasó de 97,77 a 251,28 vehículos motorizados particulares por cada 1000 habitantes. Por una parte, el vehículo particular presenta un incremento del 136% (pasando de 70 a 165 vehículos particulares por cada 1000 habitantes) y, por otra parte, el incremento de la moto particular fue del 211% (pasando de 27,8 a 86,3 motocicletas particulares por cada 1000 habitantes). Cabe destacar que el crecimiento del automóvil particular es estable para el período mientras que para la moto particular el crecimiento es más acelerado a partir de 2010. (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019b), (DAPM, Alcaldía de Cali, 2020).

<sup>9</sup> Para la Gran Encuesta Integrada de Hogares GEIH 2009-2018 realizada por el DANE para el caso de “Cali Área Metropolitana A.M” solo se agregaron solo los datos del Municipio de Cali y el Municipio de Yumbo (no se incluyó a los Municipios de Jamundí, Palmira y Candelaria, que también hacen parte del ámbito metropolitano funcional).

<sup>10</sup> La Incidencia de la Pobreza Monetaria mide el porcentaje de la población que tiene un ingreso per cápita en el hogar por debajo de la línea de pobreza, en relación con la población total.

<sup>11</sup> La Incidencia de la Pobreza Monetaria Extrema mide el porcentaje de la población que tiene un ingreso per cápita en el hogar por debajo de la línea de pobreza extrema, en relación con la población total.

Figura 50. Tasa de motorización general (vehículo particular y moto particular). (Vehículos / 1.000 habitantes)

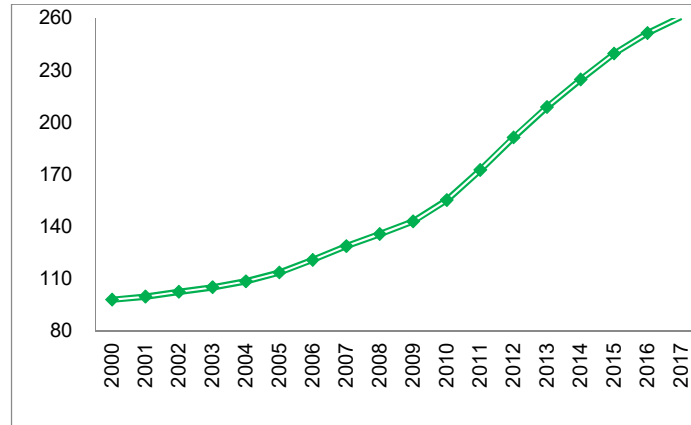


Figura 51. Tasa de motorización de vehículo particular. (Vehículos / 1.000 habitantes)

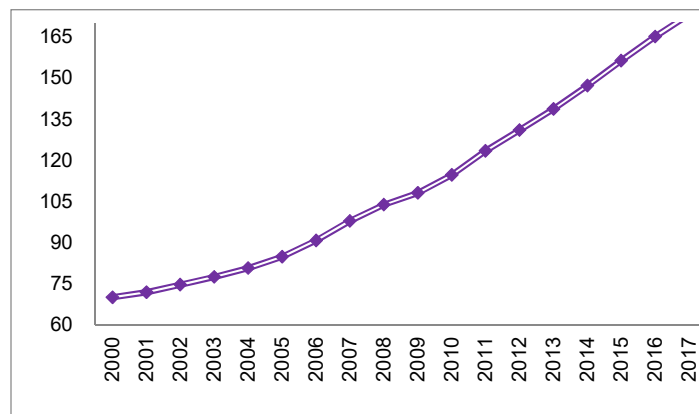
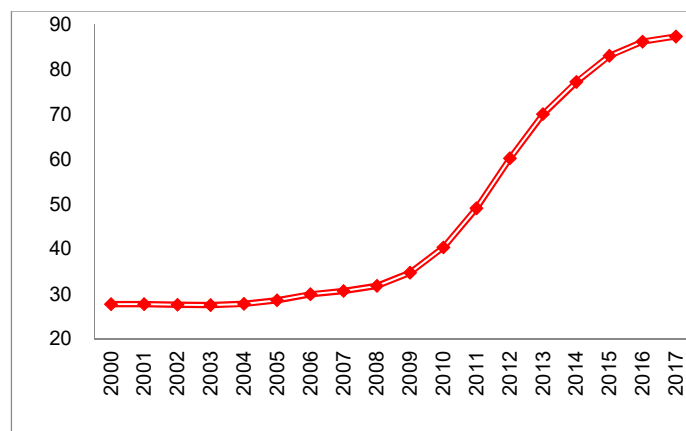


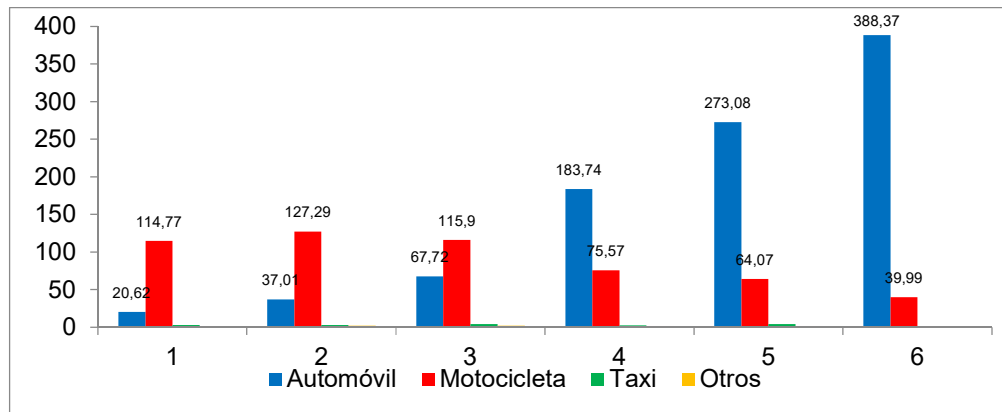
Figura 52. Tasa de motorización de moto particular. (Vehículos / 1.000 habitantes)



Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2020)

La tasa de motorización por estrato socio-económico (siendo el estrato 1 el más bajo y el estrato 6 el más alto) muestra cómo a medida que aumenta el estrato socio-económico se incrementa la tenencia de automóviles, mientras que la tenencia de motocicletas disminuye. La mayor tasa de motorización de motos está en los estratos 1, 2 y 3, en un rango entre 114,77 y 127,29 motos por 1.000 habitantes. La mayor tasa de motorización para automóvil está en el estrato 6, con de 388,37 vehículos por 1.000 habitantes.

Figura 53. Tasa de motorización según estrato socio-económico. Año 2015.

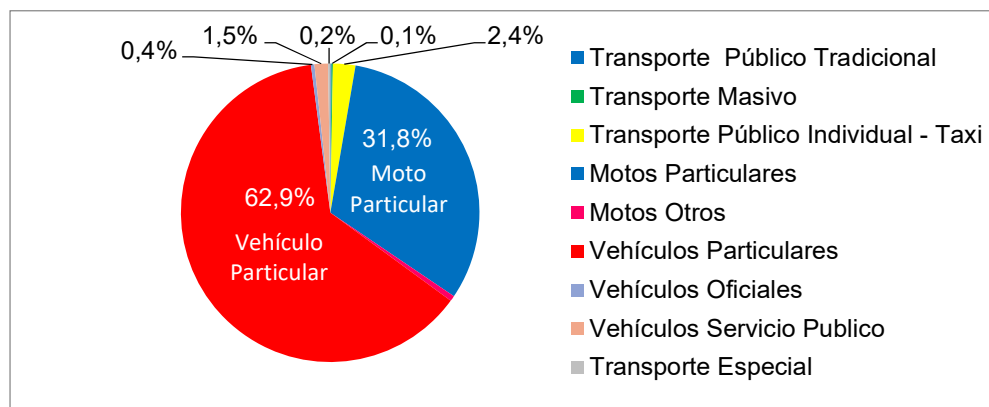


Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019b) con base en datos de (SDG & CNC, 2015)

### Parque automotor

El parque automotor registrado en el Municipio de Santiago de Cali es de 666.162 vehículos motorizados, de los cuales los vehículos particulares representan el 62,9% (418 940 vehículos particulares) y las motos particulares un 31,8% (211 538 motos particulares). En conjunto el transporte particular representa el 94,7% del total del parque automotor.

Figura 54. Parque automotor en el Municipio de Santiago de Cali (año 2017)



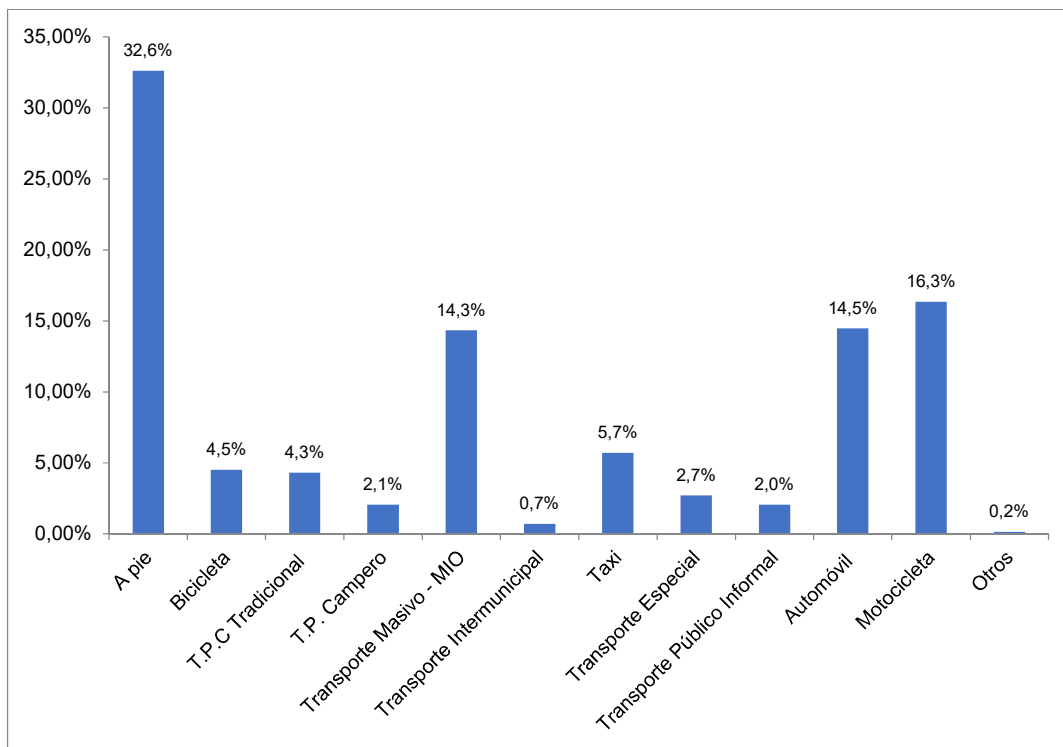
Fuente: DAPM, Alcaldía de Cali, con datos del Centro de Diagnóstico Automotor del Valle CDAV sobre vehículos registrado en Cali. Año 2017.



La demanda de viajes

En el Municipio de Cali se realizan 3 603 297 viajes en un día típico. El 37,1% (1 337 972) se realizan en modos de transporte no motorizados (Peatón 32,6% y Bicicleta 4,5%), el 21,4% (772 261) en transporte público colectivo, el 5,7% (205 834) en transporte público individual –taxi–, el 2,7% (97 769) en transporte especial, el 30,8% (1 110 849) en transporte privado (automóvil 14,5% y Moto 16,3%), el 2% (73 740) en transporte informal. (SDG & CNC, 2015).

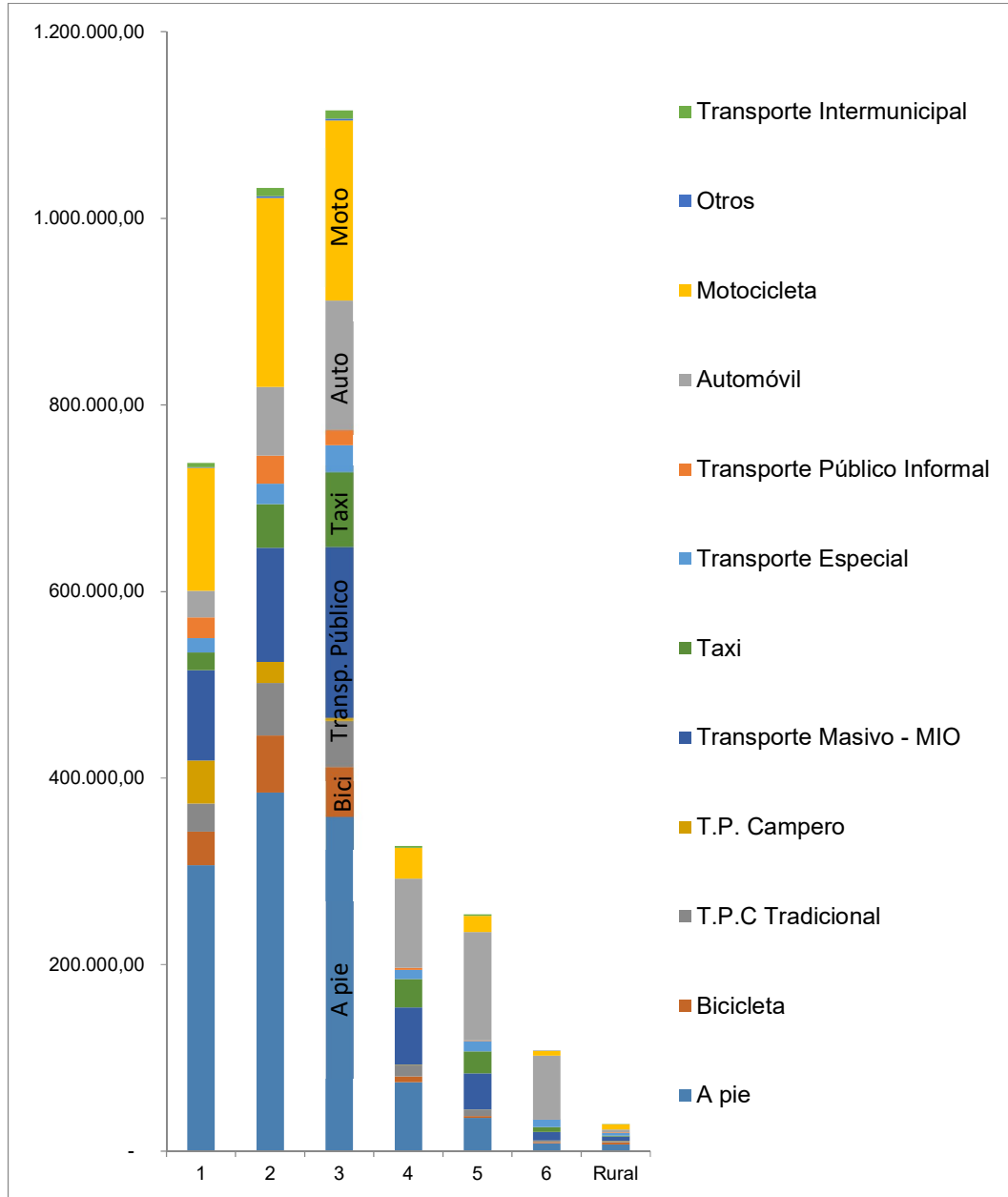
Figura 55. Reparto modal de los viajes en el Municipio de Cali (Año 2015)



Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019b) con base en datos de (SDG & CNC, 2015)

El reparto modal de los viajes varía en función del estrato socio-económico. Mientras en los estratos socio-económicos más bajos (estratos 1, 2 y 3) 1 de cada 3 viajes se hacen en modos no motorizados, en el estrato socio-económico más alto (estrato 6) la proporción es de 1 por cada 11 viajes. En cuanto a viajes en transporte privado, en los estratos más bajos 1 de cada 4 viajes se realiza en automóvil o moto, mientras que en el estrato más alto la proporción es de 2 por cada 3 viajes. (SDG & CNC, 2015).

Figura 56. Distribución de los viajes diarios y reparto modal según estrato socio-económico en el Municipio de Cali. Año 2005.

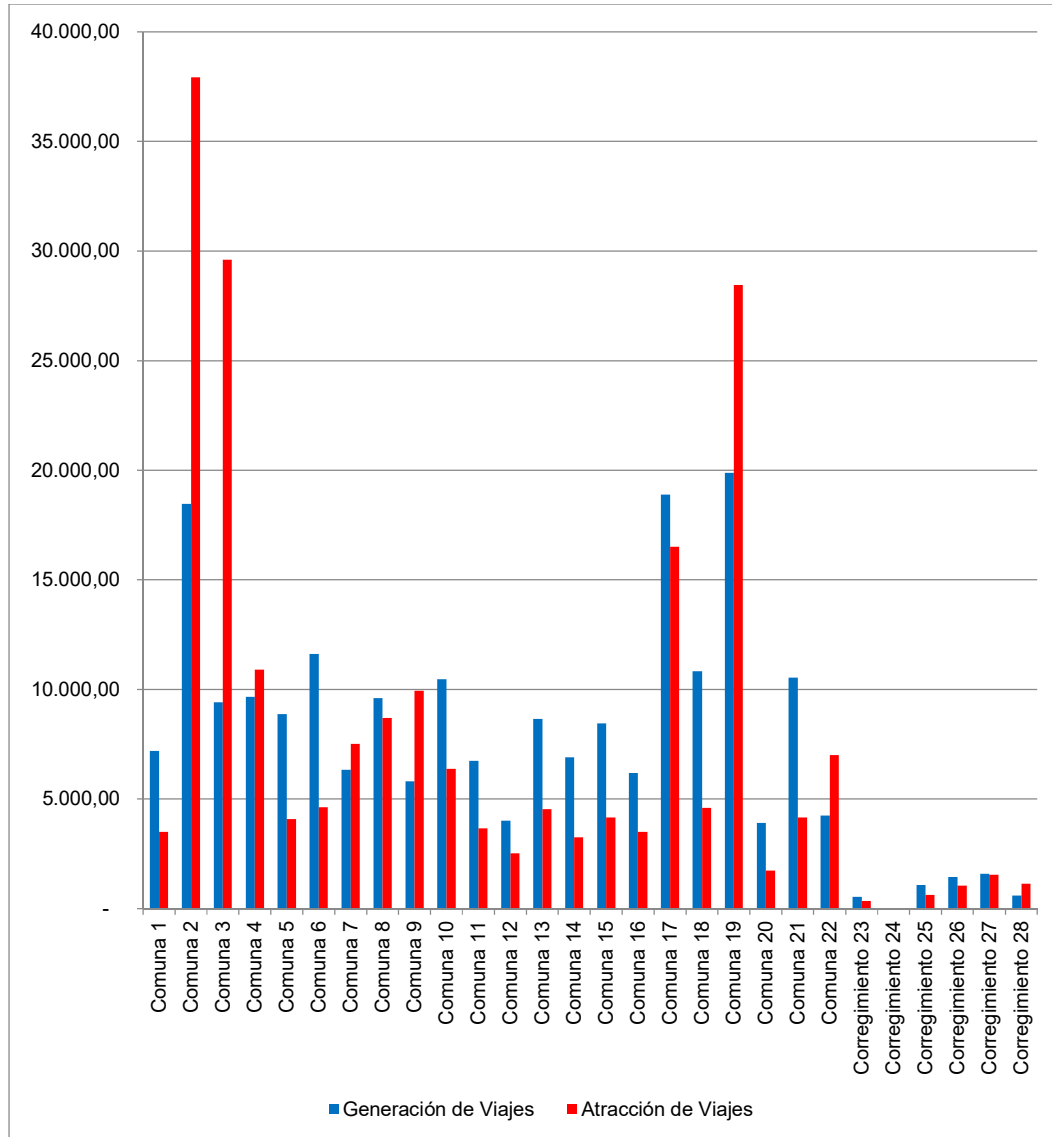


Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019b) con base en datos de (SDG & CNC, 2015)

Nota: En Transporte Público se incluye Transporte Público Colectivo TPC Tradicional, Transporte Público Colectivo en Camperos y Sistema Integrado de Transporte Masivo MIO.

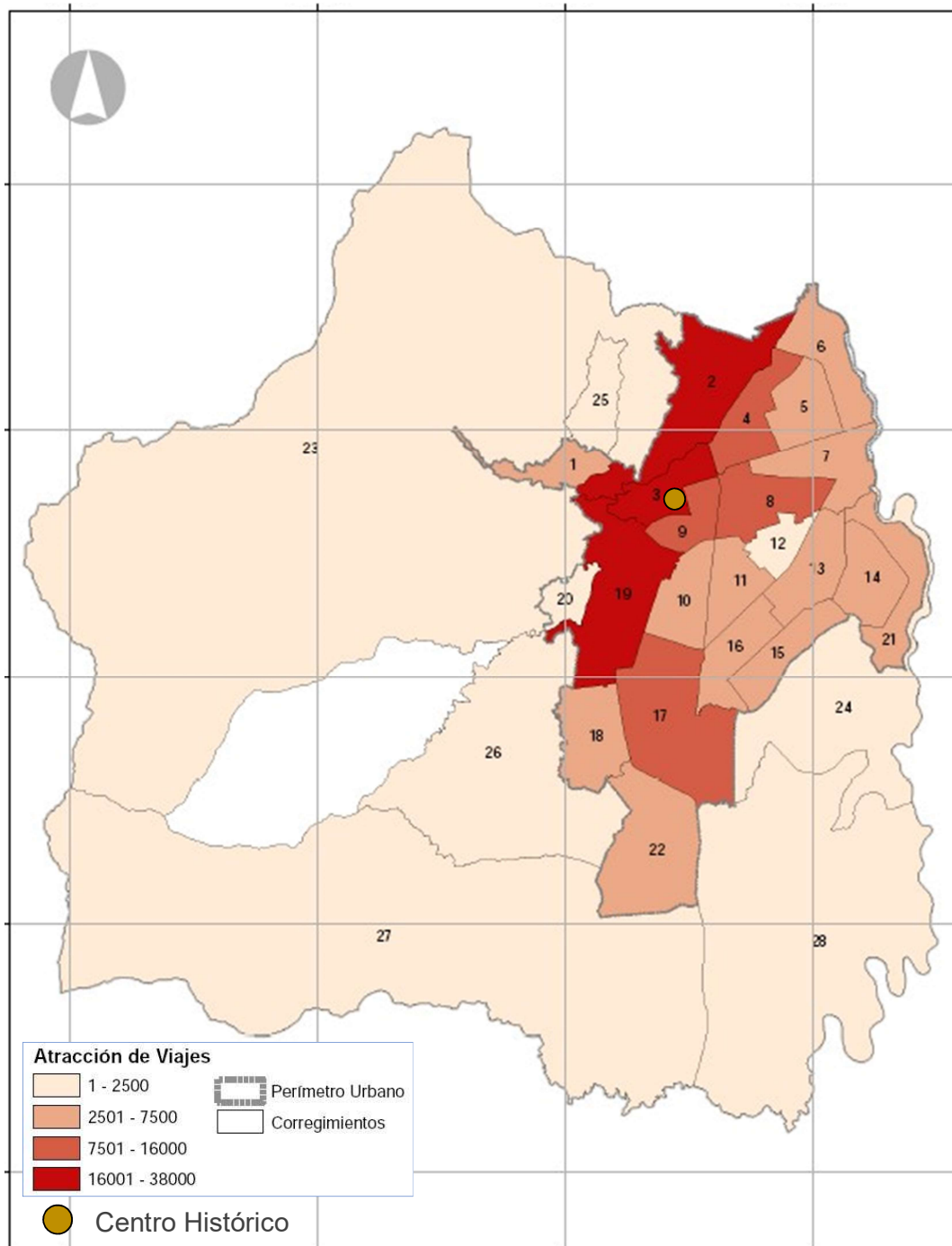
En lo que respecta a generación y atracción de viajes totales (incluyendo todos los modos de transporte), las comunas 2, 3 y 19 se destacan como los principales centros atractores, no solo por el número de viajes atraídos sino también por su relación entre viajes atraídos y generados.

Figura 57. Generación y atracción de viajes totales por comunas y corregimientos.



Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019b) con base en datos de (SDG & CNC, 2015)

Figura 58. Atracción de viajes totales por comunas y corregimientos.



Fuente: (DAPM, Alcaldía de Cali, 2019b) plano 116, con base en datos de (SDG & CNC, 2015)

### 5.2.6 Centro Histórico

Para la aplicación práctica se ha establecido un cordón que delimita el Centro Histórico de Santiago de Cali, zona que presenta altas externalidades negativas relacionadas con la movilidad (congestión, contaminación, siniestralidad vial) y requiere de intervenciones en favor de los modos de transporte sostenibles (peatón, bicicleta y transporte público).

Cabe destacar que el Centro Histórico de Santiago de Cali y sus inmediaciones presenta las mayores densidades de usos terciarios, comerciales e institucionales de la ciudad, y es el centro financiero y de servicios del sur-occidente del país. Por ello, sigue siendo uno de los principales centros atractores de viajes de la ciudad.

Figura 59. Concentración de empleos en Santiago de Cali: Comercio, servicios e industria

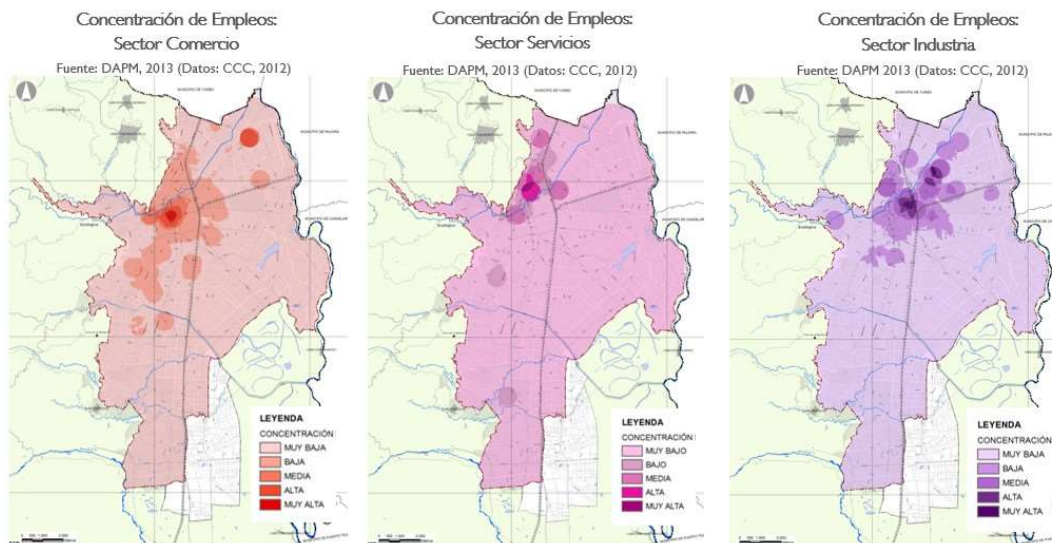
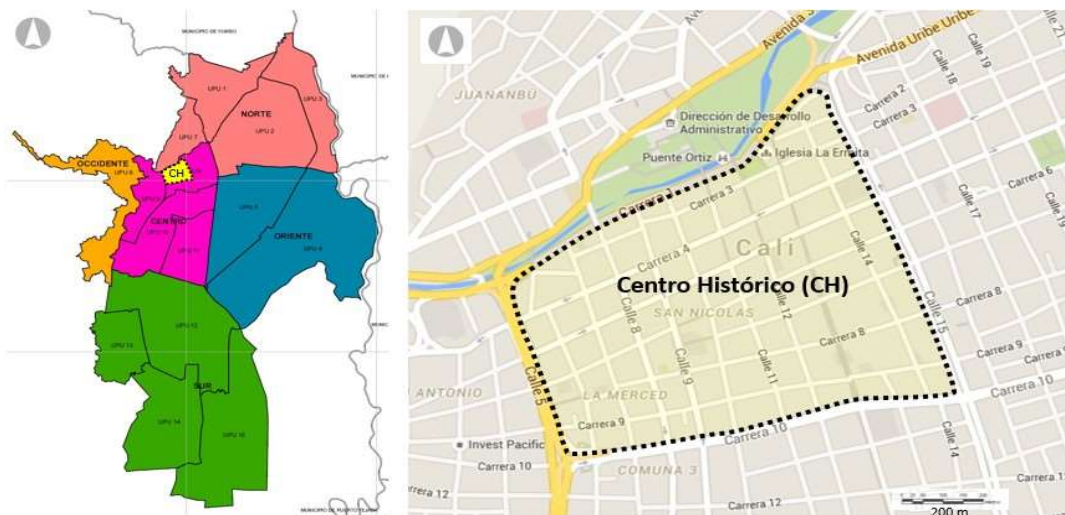


Figura 60. Localización del Centro Histórico y delimitación de la zona de análisis

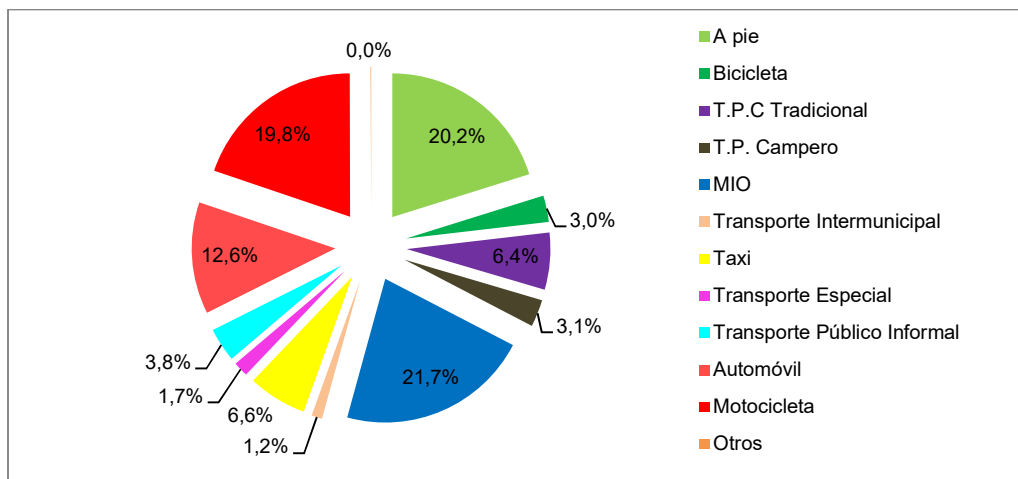


Se trata de una zona de 3,4 Km<sup>2</sup>, entre las Calles 5 y 15 y las Carreras 1 y 10. Un Centro Histórico relativamente pequeño en el cual se localiza la mayor concentración de edificaciones de valor patrimonial de la ciudad, lo cual amerita un tratamiento con alta prioridad a los modos no motorizados, en articulación con los servicios del Sistema Integrado de Transporte Masivo SITM-MIO, cuyos corredores troncales están localizados en la Calle 13 (atravesando el Centro Histórico) y la Calle 15 (bordeando el C.H.), y corredores pre-troncales y alimentadores en la Calle 8 (atravesando el Centro Histórico) y la Calle 5, Carrera 10 y Carrera 1 (bordeando el Centro Histórico).

Con base en datos de la Encuesta de Movilidad de Cali 2015, se estima que en un día típico en Santiago de Cali se realizan 114.000 viajes que tienen como destino el Centro Histórico. De estos, el 21,6% (24.693 viajes) se realizan en el Sistema Integrado de Transporte Masivo SITM-MIO, a pie un 20,2% (22.990 viajes), en motocicleta un 19,8% (22.519 viajes), en automóvil un 12,6% (14.345).

Por otro lado, es importante resaltar que los viajes en transporte privado (automóvil y motocicleta) representan el 32,34% (36.864) de los viajes hacia el Centro Histórico, mientras que los viajes en transporte público (SITM-MIO, Transporte Público Colectivo TPC tradicional y Transporte Público TP en Campero) representan el 31,1% (35.499 viajes).

Figura 61. Reparto Modal de los Viajes Hacia el Centro Histórico de Cali



*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Encuesta de Movilidad Cali 2015 (SDG & CNC, 2015)*

De igual manera, cabe recalcar el hecho de que, durante la hora de mayor demanda de la mañana, del total de vehículos que usan la red vial del Centro Histórico, cerca del 61% corresponde a tráfico de paso (Consortio MS-GV, 2019). Esto implica que el Centro Histórico no solo se ve impactado por los viajes en vehículo particular que tienen destino en él, sino que además se ve fuertemente impactado por los viajes en vehículo particular que usan el Centro Histórico como zona de paso para acceder a otros sectores.

### 5.3 Objetivo

El objetivo de esta aplicación práctica es formular, con base en el instrumento *Road Space Retribution Charge by Congestion Costos (SCR)*, una propuesta de Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV para el caso del Centro Histórico de la ciudad de Santiago de Cali (Colombia), y evaluar el potencial impacto que esta, de manera aislada o como parte de una estrategia mixta, puede tener como gestor eficiente de movilidad.

### 5.4 Metodología

#### 5.4.1 Proceso metodológico

La aplicación práctica se desarrolla en un proceso de 3 etapas que contienen 7 pasos. A continuación, se describe el proceso para una aplicación práctica en general, incluyendo algunas consideraciones especiales para el caso concreto de la aplicación práctica en el Centro Histórico de Santiago de Cali (Colombia).

- **ETAPA 1: Penalización Objetivo**

- **Paso 1. Cálculo de la Penalización Objetivo:**

Con base en el instrumento SCR, Se calcula la Penalización Objetivo (PO), entendida esta como la demora adicional o incremento en el tiempo de viaje ( $\Delta T$ ) que deberá ser inducida en el usuario del vehículo particular de manera que internalice las externalidades negativas asociadas a la congestión. Dicha demora adicional o incremento en el tiempo de viaje ( $\Delta T$ ) se asume como un equivalente de la Tarifa Optima o Tasa por Congestión ( $T^*$ ) entendida como la penalización monetaria que el usuario del vehículo particular debería pagar para internalizar los costos sociales asociados a congestión.

- **ETAPA 2: Instrumento - Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV**

- **Paso 2. Formulación para la implementación:**

Se formula el paquete de proyectos o intervenciones urbanas mediante el cual se implementará la Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV como instrumento de gestión de la movilidad. Dicho paquete de proyectos o intervenciones se establece con base en las necesidades identificadas en la zona y las potencialidades de cada corredor viario.

Para ello, en este caso aplicado al Centro Histórico de Santiago de Cali, se usa como insumo el paquete de proyectos de RUEV incluido en el Plan Integral de Movilidad Urbana PIMU de Santiago de Cali, el cual fue aprobado en 2019.

Para la Redistribución del Uso del Espacio Viario se plantean 3 niveles de intervención urbana como se describe a continuación:

**Nivel 1 – Proyectos de Transformación Profunda:** En este nivel se incluyen proyectos en los cuales la totalidad del espacio ocupado por los existentes carriles para los modos de movilidad en transporte privado es transferido a los modos de movilidad no motorizada (peatón y bicicleta). Entre los elementos usados en el Nivel 1 se incluyen: corredor peatonal.

**Nivel 2 – Proyectos de Transformación Moderada:** En este nivel se incluyen proyectos en los cuales un porcentaje moderado del espacio ocupado por los modos de movilidad en transporte privado es transferido a los modos peatón, bicicleta y transporte público; lo cual implica la eliminación de mínimo un carril de los existentes del transporte privado. Entre los elementos usados en el Nivel 2 se incluyen: Ampliación de aceras, carril-bici, carril-bus, entre otros.

**Nivel 3 – Proyectos de Transformación Leve:** En este nivel se incluyen proyectos en los cuales un porcentaje ligero del espacio ocupado por los modos de movilidad en transporte privado es transferido a los modos peatón, bicicleta y transporte público; sin que ello implique la eliminación de carriles sino una reducción del ancho de estos. Entre los elementos usados en el Nivel 3 se incluyen: Ampliación de aceras, carril-bici, carril-bus, entre otros.

- **Paso 3: Análisis de Escenarios:**

Se realiza el diseño y análisis de 10 escenarios que incluyen los escenarios base (situación actual) y futuros (derivados de la implementación de diversos esquemas). Para ello se hace uso de un entorno de simulación microscópica del tráfico.

Se incluyen dos tipos de escenarios futuros, uno en el marco temporal del 'inmediato plazo' en el cual se asume una demanda constante, y otro en el marco temporal del 'corto plazo' en el cual se asume una reducción de la demanda de viajes como reacción al impacto de la implementación del instrumento.

En los 10 escenarios se analizan variables relacionadas con las condiciones operacionales del tráfico, las condiciones urbanísticas (distribución del espacio viario de la calzada vehicular), las externalidades ambientales por emisiones contaminantes y las externalidades económicas por congestión. Dichas variables se describen a continuación:

**Las variables urbanísticas** incluyen la distribución del espacio viario de la calzada vehicular entre los diferentes modos de transporte, con base en los kilómetros (Km) destinados a las



tipologías carril peatonal, carril semi-peatonal, carril bici, carril bus, y carril para tráfico mixto.

**Las variables de tráfico** incluyen la demora total (horas), la demora por vehículo (segundos), la distancia de viaje (Km), el tiempo de viaje (Km) y la velocidad promedio (Km/h).

**Las variables ambientales** incluyen las externalidades por emisiones de Hidrocarburos no quemados HC (g), Monóxido de Carbono CO (g) y Óxido de Nitrógeno NOx (g), el consumo de combustible (litros) y la eficiencia en el uso del combustible (Km/l),

**Las variables económicas** incluyen la externalidad del costo económico de las demoras por congestión (pesos colombianos).

- **Paso 4: Verificación de la Penalización:**

Se contrasta la Penalización Resultante PR (entendida como el  $\Delta T$  derivado de la implementación de la Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV) con la Penalización Objetivo PO (entendida como el  $\Delta T$  preestablecido como objetivo en el Paso 1). Mediante un proceso iterativo de los pasos 2, 3 y 4 de esta Etapa 2 se pueden realizar ajustes para buscar que la Penalización Resultante PR sea igual (o cercana) a la Penalización Objetivo PO. Nota: En este caso aplicado al Centro Histórico de Santiago de Cali, si una vez incorporados todos los proyectos contenidos en el Plan Integral de Movilidad Urbana PIMU no se ha logrado la igualdad (o cercanía) entre PR y PO, se pasará a la Etapa 3.

• **ETAPA 3: Otros Instrumentos – Estrategia Mixta**

- **Paso 5. Formulación para la implementación:**

Se formula una estrategia mixta en la cual se incluyen medidas de Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV, Control y Gestión del Tráfico CGT y Restricción de la Circulación Vehicular RCV. Dicho paquete de medidas de la estrategia mixta se establece con base en las necesidades y potencialidades identificadas en la zona. Para ello, en este caso aplicado al Centro Histórico de Santiago de Cali, se usa como insumo el paquete de proyectos de RUEV, y una selección de programas y proyectos de CGT y RCV incluidos en el Plan Integral de Movilidad Urbana PIMU de Santiago de Cali aprobado en 2019.

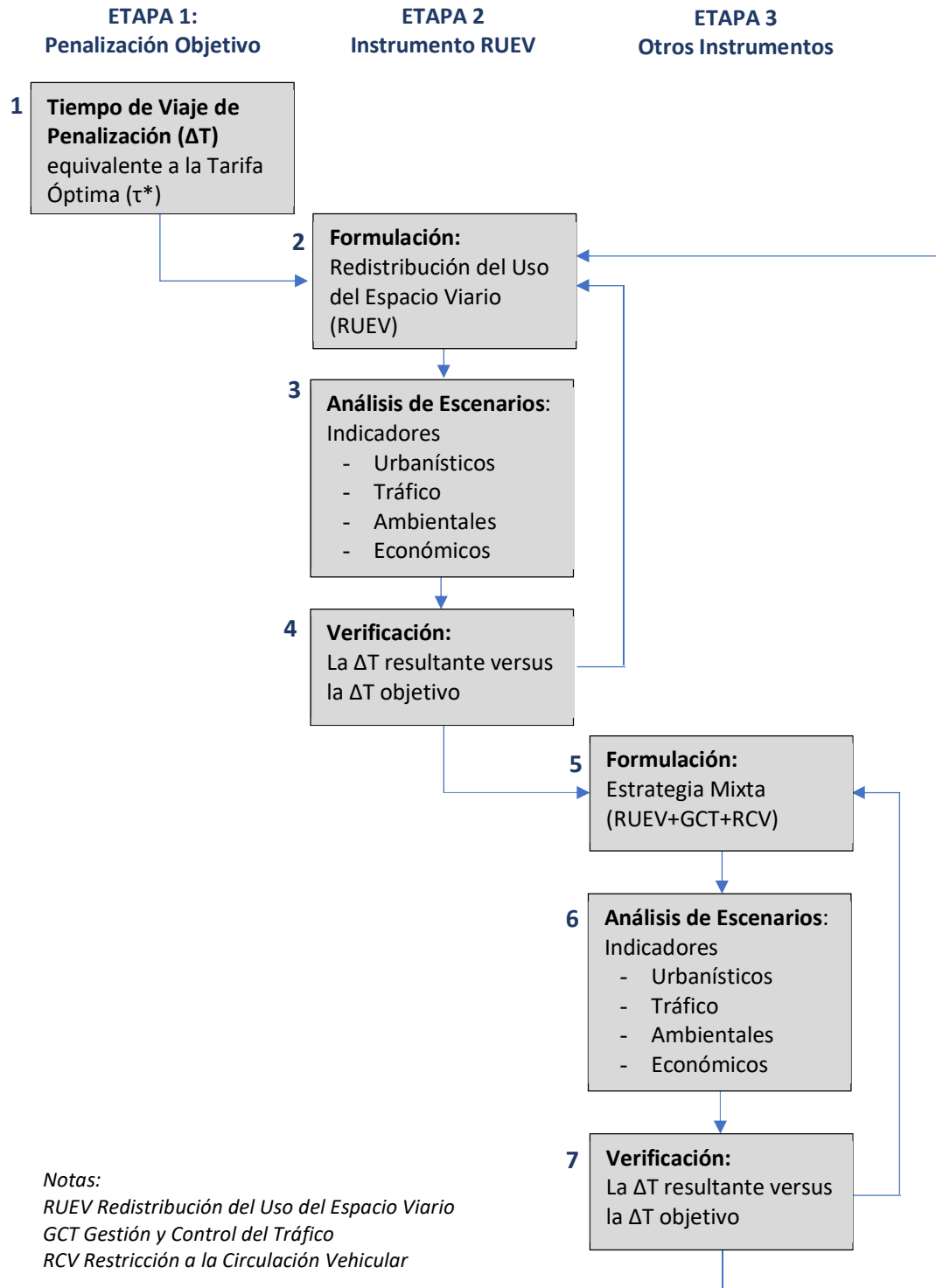
- **Paso 6. Análisis de Escenarios:**

Proceso similar al descrito en el Paso 3 de la Etapa 2.

- **Paso 7. Verificación de Penalización:**

Proceso similar al descrito en el Paso 4 de la Etapa 2.

Figura 62. Diagrama del proceso de la aplicación práctica



#### **5.4.2 Datos:**

Para la realización de la aplicación práctica se contó con diversos insumos del Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM de la Alcaldía de Cali, organismo que fue la principalmente fuente de datos e información del componente de tráfico, urbanístico y económico. De igual manera, se usaron datos e información de otros organismos tanto de la administración central como de organismos descentralizados de la Alcaldía de Cali.

Entre los estudios y planes que sirvieron de insumo principal para el desarrollo del presente apartado se encuentran los siguientes:

- Los datos, información y modelo de micro-simulación de tráfico contenidos en el “Estudio de Intensidad de tránsito, velocidades, capacidad vial y nivel de servicio en la zona centro de Cali”, elaborado por la Universidad del Valle en el año 2013 ([Univalle, 2013](#)), comisionado por la el Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM de la Alcaldía de Cali.
- Los datos e información de tráfico contenidos en el estudio “Actualización del modelo de transporte de la ciudad de Cali para el uso de entidades centralizadas del gobierno municipal y la elaboración y análisis de escenarios de simulación”, elaborado por la Universidad del Valle en el año 2016 ([Univalle, 2016](#)), comisionado por la el Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM de la Alcaldía de Cali.
- Los datos e información de movilidad contenidos en la “Encuesta de Movilidad de Cali 2015” ([SDG & CNC, 2015](#)), elaborada por Steer Davies Gleave SDG y Centro Nacional de Consultoría CNC, comisionado por Metro Cali S.A.
- Los datos e información de movilidad y los proyectos de redistribución de uso del espacio viario en el Centro Histórico contenidos en el “Plan Integral de Movilidad Urbana - PIMU Visión 2030” ([DAPM, 2019](#)), Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM, Alcaldía de Cali.
- Los datos e información de espacio público, contenidos en el estudio del Plan Especial de Espacio Público y Equipamientos Colectivos (PEEPEC), en el cual se muestra la necesidad de mejorar las condiciones peatonales del centro histórico de Santiago de Cali.

## 5.5 Diseño y descripción de escenarios

Para la aplicación al caso práctico del Centro Histórico de Santiago de Cali se diseñaron y simularon, con el apoyo del software especializado, diversos escenarios que incluyen tanto el escenario base (situación actual) como los escenarios futuros derivados de la implementación de los diversos esquemas de gestión de la movilidad propuestos, tanto de manera independiente como combinada entre ellos.

De igual manera, se incorporaron escenarios que corresponden al horizonte temporal del ‘corto plazo’ y del ‘mediano plazo’. En el corto plazo se asume una demanda constante con respecto al escenario base de la situación actual. En el mediano plazo se asumen potenciales variaciones de la demanda como efecto de las medidas implementadas. Para la estimación de la variación de la demanda se asumieron elasticidades con respecto al costo generalizado del viaje con base en las fuentes secundarias disponibles.

En la siguiente tabla se listan y describen los 8 escenarios seleccionados después de un primer ejercicio de simulación el cual se realizó con 17 escenarios preliminares. Con base en estos 8 escenarios se presentará el desarrollo realizado para la aplicación práctica al caso del Centro Histórico de Santiago de Cali.

Tabla 13. Descripción de escenarios para la aplicación práctica caso Santiago de Cali

Escenario	Código	Nombre y descripción
Escenario 1	S2	<b>Base Situación Actual</b> Escenario base correspondiente a la situación actual, se constituye en la línea base con respecto a la cual se evalúan los demás escenarios propuestos. En este se considera la actual restricción de circulación vehicular del 20% de los vehículos particulares <sup>12</sup> .
Escenario 2	S3	<b>Esquema con Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV):</b> Escenario propuesto mediante la implementación de los proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV). Horizonte temporal del corto plazo con demanda constante con respecto al escenario base situación actual.
Escenario 3	S5	<b>Esquema con Gestión y Control del Tráfico (GCT):</b>

<sup>12</sup> En este escenario se considera la actual restricción de circulación vehicular que aplica para toda el área urbana de la ciudad, incluido el Centro Histórico, y conforme a la cual diariamente el 20% de los vehículos particulares no tienen permitido circular en los periodos punta de la mañana (6-10 am) y la tarde (4-8 pm).

		Escenario propuesto mediante la implementación de los proyectos de Gestión y Control de Tráfico (GCT). Horizonte temporal del corto plazo con demanda constante con respecto al escenario base situación actual. Las medidas TCM incluyen la implementación de la fase verde para peatón en las intersecciones que ya cuentan con regulación semafórica y la implementación de la regulación semafórica en las intersecciones que aún no cuentan con ella.
Escenario 4	S7	<b>Esquema con Restricción de Circulación Vehicular (RCV):</b> Escenario propuesto mediante la implementación de una Restricción de Circulación Vehicular del 40% de los vehículos particulares. Horizonte temporal del corto plazo con demanda constante con respecto al escenario base situación actual.
Escenario 5a	S8	<b>Esquema Híbrido con Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV + GCT):</b> Escenario propuesto mediante la implementación combinada de la Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV) y la Gestión y Control del Tráfico (GCT). Horizonte temporal del corto plazo con de demanda constante con respecto al escenario base.
Escenario 5b	S9A	<b>Esquema Híbrido con Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV + GCT), con Demanda Ajustada según elasticidad <math>e = -1,05</math></b> Escenario propuesto mediante la implementación combinada de la Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV) y la Gestión y Control del Tráfico (GCT). Horizonte temporal del mediano plazo con demanda ajustada según elasticidad $e = -1,05$ con respecto al escenario base situación actual.
Escenario 6	S10	<b>Esquema Híbrido con Redistribución del Uso del Espacio Viario y Restricción de Circulación Vehicular (RUEV + RCV):</b> Escenario propuesto mediante la implementación combinada de la Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV) y la Restricción de Circulación Vehicular (RCV) del 40% de los vehículos particulares. Horizonte temporal del corto plazo con demanda constante con respecto al escenario base situación actual.
Escenario 7	S12	<b>Esquema Híbrido con Redistribución del Uso del Espacio Viario, Gestión y Control del Tráfico y Restricción de Circulación Vehicular (RUEV + GCT + RCV):</b> Escenario propuesto mediante la implementación combinada de la Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV), la Gestión y Control del Tráfico (GCT) y la Restricción de Circulación Vehicular (RCV) del 40% de los vehículos particulares. Horizonte temporal del corto plazo con demanda constante con respecto al escenario base situación actual.

En análisis de los escenarios se hizo con base en modelos de simulación de tráfico. Para el modelo de micro-simulación se usó el software SYNCHRO, el cual utiliza a su vez la herramienta de micro-simulación SIMTRAFFIC.

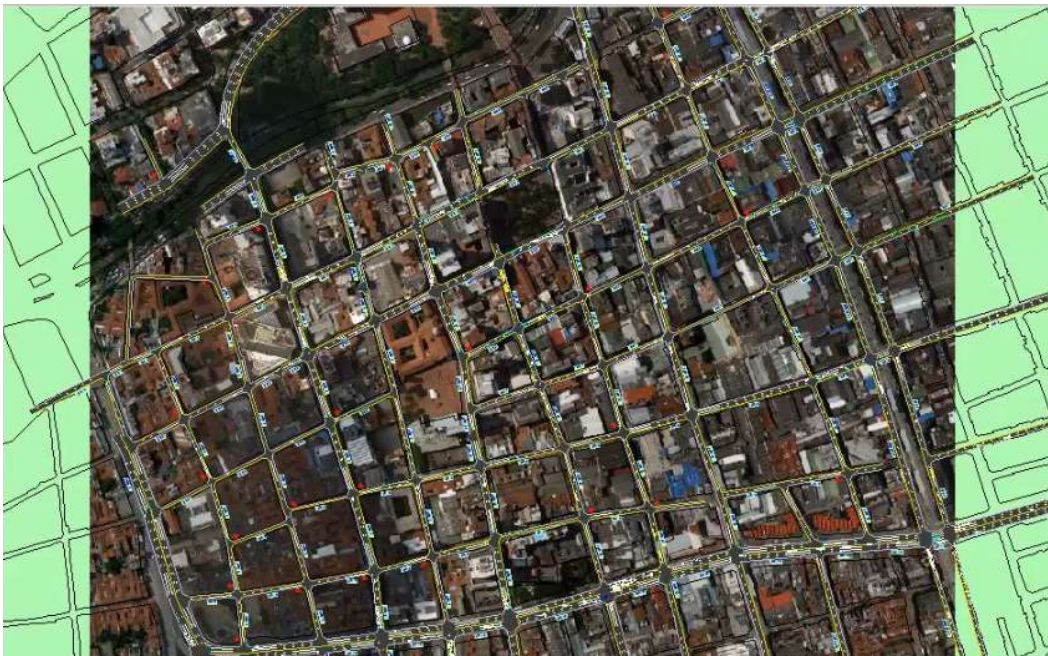
Esta es una herramienta informática basada en la metodología del *Highway Capacity Manual HCM* para todo tipo de intersecciones, el cual además tiene la capacidad de optimizar tiempos de semaforización.

SYNCHRO permite mostrar de una manera sencilla los efectos del tráfico en las intersecciones e implementa la “Utilización de la Capacidad de la Intersección” (UCI) el cual es un método que compara el volumen actual de las intersecciones versus su capacidad, otorgando unos valores en porcentaje que dan cuenta de su uso. Esta herramienta incluye además los cálculos de las demoras de cola por bloqueo de la intersección y optimización de duración de ciclos semafóricos.

El software se fundamenta principalmente en las fórmulas del HCM con lo cual hace uso de factores claves como el Factor de Hora Pico (FHP) con el cual determina las tasas de flujo, de la misma manera usa las tasas de saturación para el cálculo de volumen-capacidad.

Para la determinación de medidas de eficiencia, el programa determina la demora total como la suma de la demora de control y la demora por colas, adicional a eso usa el método de Webster (con el cual calcula el factor de progresión), método de demora percentil, cálculo de longitudes de cola y niveles de servicio de la intersección.

Figura 63. Simulación con SYNCHRO-SIMTRAFFIC en Centro Histórico de Cali.



## 5.6 Penalización en tiempo de viaje

### 5.6.1 Cálculo del costo generalizado del viaje

El Costo Generalizado de Viaje (CGV) es la suma del valor monetario de todos los determinantes de la demanda de transporte para un individuo: Se utiliza el dinero como unidad común de medida (en lugar de la satisfacción o cualquier otra variable) porque permite una comparación interpersonal más objetiva, aunque esto implica considerar también de manera implícita que todos los individuos comparten una misma valoración de la renta.

Se calcula como una combinación lineal de tres elementos: los componentes monetarios del viaje ( $p$ ), el valor del tiempo total empleado en el mismo ( $vt$ ) y la valoración monetaria del resto de elementos cualitativos que intervienen en la decisión ( $\theta$ ):

$$g = p + vt + \theta$$

El primero es el componente monetario o precio del viaje, el cual incluye todos los desembolsos y pagos que debe hacer el usuario con el fin de trasladarse de un lugar a otro. En el caso del transporte privado, el componente monetario  $p$  incluye el precio del combustible consumido, los peajes y gastos de estacionamiento, así como parte proporcional del costo de adquisición, alquiler y mantenimiento del vehículo (incluyendo seguros, reparaciones, impuestos, etc.).

El segundo componente es el valor monetario del tiempo empleado en el viaje. Aunque este elemento no necesariamente se traduce en un pago monetario, sí constituye siempre un costo para el usuario. Su importe se obtiene del producto del tiempo total invertido en el transporte por el valor de cada unidad de dicho tiempo. La duración total del viaje depende habitualmente de la distancia recorrida y de la velocidad a la que se viaja, y puede descomponerse a su vez en distintas etapas o trayectos más cortos (tiempo en el vehículo, tiempo de espera y tiempos intermedios). En general el valor unitario del tiempo  $v$  dependerá del costo de oportunidad de éste para cada usuario y suele asociarse al salario. Éste se conoce como el valor subjetivo del tiempo.

El tercer y último componente del costo generalizado del viaje es la valoración monetaria de los aspectos cualitativos del viaje. A igualdad de precios y tiempos de viaje, un pasajero puede preferir un modo de transporte a otro, por factores relacionados, por ejemplo, con la comodidad o la seguridad. Sin embargo, suele resultar muy difícil cuantificar  $\theta$  de forma objetiva con el fin de poder hacer comparaciones válidas entre individuos. Por esta razón, estos aspectos cualitativos suelen omitirse en el análisis formal de la demanda de transporte, considerando implícitamente – aunque tal vez no sea un supuesto correcto para algunos viajeros – que su impacto es insuficiente para alterar las decisiones ya basadas en  $p$  y  $vt$ .

### El componente monetario del viaje

Para estimar las variables del componente monetario o precio del viaje  $p$ , se trabajó con un automóvil marca Chevrolet Spark, que de acuerdo a la base de datos entregada por el Centro de Diagnóstico Automotor del Valle (CDAV) es el automóvil particular con mayor número de registros activos en Cali a diciembre de 2016, con un cilindraje de 1.200 cc. Para este tipo de automóvil el costo del Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito – SOAT – en la vigencia 2016 fue de alrededor de COP 350.000, el seguro todo riesgo con un costo aproximado de COP 1.300.000, los impuestos por rodamiento ascienden a COP 400.000 y en mantenimiento y reparaciones al año se estiman unos COP 98.100<sup>13</sup> teniendo en cuenta que en promedio un vehículo recorre aproximadamente 8.500 kilómetros por año. El precio promedio de un galón de gasolina corriente de motor en 2016 fue de COP 7.852<sup>14</sup> y de acuerdo a los datos de rendimiento de gasolina para este tipo de vehículo en la ciudad es de aproximadamente 50 km/galón<sup>15</sup>.

Con el fin de determinar el gasto en estacionamiento se tomaron los valores obtenidos en el “Estudio de Oferta y Demanda de Estacionamiento en las 12 Zonas Definidas por el DAPM” realizado por la Universidad del Valle, el cual concluye que en la ZER 6 Centro Ampliado (que incluye el Centro Histórico) la tarifa promedio por hora de estacionamiento fuera de vía pública es de COP 1.817 para automóviles. Para estimar el gasto en estacionamiento se consideran que los viajes se realizan por motivo de trabajo, con lo cual el tiempo promedio laboral es de 8 horas por día.

Para estimar la distancia promedio recorrida por un vehículo particular en la ciudad de Cali, se usaron los resultados del modelo de transporte. Luego de la asignación de la matriz de volúmenes de vehículos particulares para el año 2016 (72.490 vehículos), el modelo arrojó un número de vehículos por cada arco (tramo vial) de la red actual del municipio; luego se obtuvo la sumatoria del producto del volumen de cada arco por la longitud del arco, de manera que se obtuvo el total de kilómetros recorridos en la hora punta por vehículos particulares.

$$Kt = \sum_i^n (V_{Ai} * L_{Ai})$$

Donde

$Kt$  Kilómetros totales recorridos en hora punta por vehículos privados

$V_{Ai}$  Volumen de vehículos privados en la hora punta en el arco  $i$

<sup>13</sup> Tomado de <http://www.finanzaspersonales.co/consumo-inteligente/articulo/cuanto-cuesta-revisar-carro/51309> Consultado el día 25 de octubre de 2017

<sup>14</sup> Según datos obtenidos de <https://www.minminas.gov.co/precios-ano-2016> Consultado el día 25 de octubre de 2017

<sup>15</sup> Tomado de <http://www.autodaewoospark.com/rendimiento-de-gasolina.php> Consultado el día 25 de octubre de 2017



$L_{Ai}$  = Longitud en kilómetros del arco  $i$

$$Kt = 1.637.285,78 \text{ km}$$

Finalmente se dividió el total de kilómetros recorridos entre el volumen de vehículos asignados, de esta manera se obtuvo el recorrido promedio en kilómetros por vehículo.

$$Kp = \frac{Kt}{Veh}$$

Donde

$Kp$  Kilómetros promedio recorridos en hora punta por vehículos privados

$Kt$  Kilómetros totales recorridos en hora punta por vehículos privados

$Veh$  Número de Vehículos privados asignados a la red (en este caso 72.490 vehículos)

Con la ecuación anterior se obtiene que un vehículo particular recorre aproximadamente 22,59 km en la hora punta.

$$Kp = \frac{1.637.285,78}{72.490}$$

$$Kp = 22,59 \text{ km}$$

Con la distancia recorrida y el rendimiento del combustible se obtiene la información acerca del consumo de gasolina por día, que equivale a 0,45 galones, los cuales multiplicados por el precio del galón arroja un resultado de COP 3.548. Es decir que, con COP 3.548 se pueden recorrer aproximadamente 22,59 km en la ciudad.

Para calcular el componente monetario o precio del viaje  $p$  en automóvil particular, es necesario estimar el costo por día del seguro obligatorio, los impuestos y el mantenimiento, entre otros<sup>16</sup>. Con base en lo anterior, el componente monetario o precio del viaje  $p$  en automóvil particular equivale a COP 23.010

### El valor monetario del tiempo de viaje

El segundo componente corresponde al valor monetario del tiempo empleado en el viaje y de acuerdo con la encuesta de movilidad Cali Hogares 2015, el tiempo promedio de viaje en transporte privado (automóvil) para la ciudad de Cali es de 44,22 minutos, es decir que un conductor de automóvil particular invierte cerca de 45 minutos al día conduciendo.

<sup>16</sup> Para este caso se asumen los siguientes valores: (i) Seguro obligatorio: COP 3.562 por día (ii) Impuestos: COP 1.096 por día. (iii) Reparación y mantenimiento: COP 269 por día. (iv) Consumo de gasolina: COP 3.548 por día. (v) Estacionamiento: COP 14.536 por día.

Para estimar el valor subjetivo del tiempo, es decir lo que los usuarios consideran que vale el minuto de viaje por hacer uso del vehículo particular, se parte de unos supuestos básicos:

Tabla 14. Supuestos base para la estimación del valor subjetivo del tiempo

Aspecto	Categoría o Valor
Modo de transporte:	Vehículo particular
Características del viaje:	Trabajo
Características del individuo:	Nivel socio-económico 4 y 5
Ingresos promedio mensuales:	COP 3.500.000
Horas laboradas mes:	192
Ingreso promedio por hora – IPH	COP 18.229,17
Porcentaje de viajes por trabajo – PT	89%
Porcentaje de viajes por ocio – PO	11%
Valor del tiempo de Ocio (30% del ingreso) - VTO	COP 5.468,75
Tasa de ocupación	1,438
VST Valor Subjetivo del Tiempo por hora	COP 16.825,52
VST Valor Subjetivo del Tiempo por minuto	COP 280,43

*\*Ingresos por persona. Tomado de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-12779552>*

El ingreso promedio mensual fue calculado con base en el salario de un hogar de estrato alto en Colombia, el cual es de COP 10.850.000 según informe de Raddar Consumer Group (2013). De acuerdo a la Encuesta de Calidad de Vida 2016 (DANE, 2016) en el en las cabeceras municipales del Departamento del Valle de Cauca (del cual Santiago de Cali es su capital) el promedio de personas que conforman un hogar es de 3,1. Con base en lo anterior, el ingreso promedio mensual es de COP 3.500.000

El ingreso promedio por hora es el resultado de dividir el ingreso promedio mensual entre las horas laborales mensuales. Asumiendo 192 horas laborales mensuales el ingreso promedio es COP 18.229,17 por hora.

Para calcular el valor subjetivo del tiempo se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Valor Subjetivo del Tiempo} = (IPH * PT) + (VTO * PO)$$

Donde:

*IPH: Ingresos promedio por hora*

*PT: Porcentaje de viajes por trabajo<sup>17</sup>*

*VTO: Valor del tiempo de ocio, equivalente al 30% del ingreso promedio por hora<sup>18</sup>*

<sup>17</sup> Fuente: SDG & CNC (2015) Encuesta de Movilidad de Cali 2015

<sup>18</sup> Se define que el valor del tiempo de ocio equivale al 30% del valor del tiempo de trabajo (ingreso promedio por hora de acuerdo con información del Banco Mundial referenciado en el documento “Cálculo de precios sociales: el valor social del tiempo” elaborado por José Luis Bonifaz Fernández).

*PO: Porcentaje de viajes por ocio<sup>19</sup>*

$$\text{Valor Subjetivo del Tiempo} = (18.229,17 * 89\%) + (5.468,75 * 11)$$

$$\text{Valor Subjetivo del Tiempo} = 16.825,52 \text{ por hora}$$

$$\text{Valor Subjetivo del Tiempo} = \frac{16.825,52}{60}$$

$$\text{Valor Subjetivo del Tiempo} = \text{COP } 280,43 \text{ por minuto}$$

De lo anterior se obtiene el valor monetario del tiempo empleado en el viaje  $Vt$  como el producto del tiempo de viaje por el valor subjetivo del tiempo:

$$Vt = 44,22 * 280,43$$

$$Vt = \text{COP } 12.400 \text{ por viaje}$$

#### El valor monetario de los aspectos cualitativos del viaje

Dado que, en el marco de la información disponible, resulta muy difícil cuantificar la valoración monetaria de los aspectos cualitativos del viaje, se asume que su impacto es insuficiente para alterar las decisiones ya basadas en  $p$  y  $vt$ .

#### El costo generalizado del viaje

Por lo tanto, el costo generalizado del viaje en vehículo particular se obtiene como la suma de  $p$  y  $vt$ .

$$g = p + vt$$

$$g = 23.010 + 12.400$$

$$g = 35.410$$

Es decir que el costo generalizado de un viaje en vehículo particular es en promedio de COP 35.410; dicho costo podrá aumentar o disminuir en función de si se dispone de un estacionamiento gratuito en el sitio de trabajo, o si el tiempo de viaje se incrementa o disminuye por efecto de la congestión o la distancia promedio a recorrer.

<sup>19</sup> Fuente: SDG & CNC (2015) Encuesta de Movilidad de Cali 2015. Se excluyeron las compras dado que en la hora punta de la mañana los almacenes se encuentran cerrados.

### 5.6.2 Cálculo de los costos económicos por congestión

En la metodología para el cálculo del Costo Económico por Congestión, entendido aquí como Pérdidas Económicas por Congestión (PEC), se usaron diversas fuentes secundarias<sup>20</sup> y se definieron las siguientes variables:

- $i$ :** Escenarios.
- $k$ :** Tipo de vehículo (Vehículo Particular)
- $tv_{ik}$ :** Tiempo de viaje promedio en vehículo particular para el escenario  $i$  (minutos).
- $V_{ik}$ :** Cantidad de vehículos particulares que ingresan a la red en el escenario  $i$
- $OC_k$ :** Tasa de Ocupación promedio de los vehículos particulares. Pasajeros por vehículos (pas/veh).
- $VST_k$ :** Valor Subjetivo del Tiempo para el vehículo particular (\$/min).
- $TV_{ik}$ :** Tiempo de viaje total para el vehículo particular en el escenario  $i$  (horas).
- $Tm_{ik}$ :** Tiempo total de viaje en movimiento del vehículo particular en el escenario  $i$  (horas).
- $Dem_{ik}$ :** Demora total para los vehículos particulares en el escenario  $i$  (horas).
- $d_{ik}$ :** Demora promedio para los vehículos particulares en el escenario  $i$  (minutos).

Los datos de cantidad de vehículos particulares que ingresan a la red, tiempo de viaje total para el vehículo particular y demora total para los vehículos particulares se obtienen de los resultados de las simulaciones microscópicas de tráfico realizadas para los 8 escenarios preseleccionados los cuales fueron listados y descritos en el apartado 5.5 del presente documento.

Para la tasa de ocupación promedio de los vehículos particulares se tomó 1,43 con base en Univalle (2016)<sup>21</sup>

<sup>20</sup> El porcentaje del tráfico en la Hora de Mayor Demanda en el Centro Histórico corresponde a los datos obtenidos en las Estaciones Maestras del “Estudio de intensidad de tránsito, velocidades, capacidad vial y nivel de servicio en la zona centro de Cali” realizado por la Universidad del Valle para la Alcaldía de Cali en el año 2013. Univalle (2013). El salario promedio de los hogares de clase media en el Departamento del Valle del Cauca fue tomado de [www.eltiempo.com/Multimedia/infografia/ingresoshogares/](http://www.eltiempo.com/Multimedia/infografia/ingresoshogares/).

<sup>21</sup> Univalle (2016) “Estudio de actualización del modelo de transporte de la ciudad de Cali”. Universidad del Valle comisionado por Alcaldía de Cali. 2016.

Para el valor subjetivo del tiempo se estimó en COP 280,43 por minuto (COP 16.825,52 por hora)

Para calcular el tiempo de viaje promedio ( $tv_{ik}$ ) se empleó la siguiente ecuación:

$$tv_{ik} = \frac{TV_{ik}}{V_{ik}} * 60$$

El tiempo total de viaje en movimiento ( $Tm_{ik}$ ) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Tm_{ik} = TV_{ik} - Dem_{ik}$$

La demora promedio ( $d_{ik}$ ) se calculó mediante la siguiente expresión:

$$d_{ik} = \frac{Dem_{ik}}{V_{ik}} * 60$$

Las Pérdidas Económicas por Congestión están asociados a las demoras de los usuarios, aunque la acción de movilizarse por sí sola tiene demoras asociadas, éstas se agudizan cuando el número de usuarios aumenta, limitando que cada uno de los usuarios decida seleccionar la velocidad a la cual desea viajar y estaría condicionado a movilizarse a la velocidad de operación, la cual disminuye a medida que se incrementa el flujo vehicular en una vía.

Las Pérdidas Económicas por Congestión se calcularon para tres (3) horizontes temporales: la Hora de Mayor Demanda – HMD –, diario y anual.

Para el cálculo de las Pérdidas Económicas por Congestión – PEC – en la Hora de Mayor Demanda se empleó la siguiente ecuación:

$$PEC_{HMD} = d_{ik} * V_{ik} * OC_k * VST_k$$

Es decir que las Pérdidas Económicas por Congestión para la hora de mayor demanda son el resultado de multiplicar las demoras promedio, la cantidad de vehículos que ingresan a la red, la tasa de ocupación y el Valor Subjetivo del Tiempo.

Para calcular las Pérdidas Económicas por Congestión diarias se parte del hecho de que el período de mayor demanda en el Centro Histórico representa el 8,1% del total del tráfico en un día laboral típico, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$PEC_{diario} = \frac{CSC_{HMD} * 100\%}{8,10\%}$$

Las Pérdidas Económicas por Congestión anuales son el resultado de multiplicar las Pérdidas Económicas por Congestión diarias por el número de días hábiles en el año, que para 2017 fueron 243.

$$PEC_{anual} = CSC_{diario} * 243$$

Con base en lo anterior, las Pérdidas Económicas por Congestión (PEC) en el Centro Histórico en el escenario base (situación actual) en la Hora de Mayor Demanda HMD son de COP 60.913.581 (a razón de COP 5.524 por kilómetro), en un día típico son de COP 752.019.520 y en un año ascienden a unos COP 182.740.743.413.

### 5.6.3 Cálculo de la penalización

En este apartado se presenta el cálculo de la penalización requerida para que el vehículo particular internalice sus externalidades negativas por congestión. Esto implica el cálculo de la penalización monetaria, es decir, la tasa por congestión, y posteriormente su equivalente de penalización en tiempo de viaje, el cual deberá ser generado por alguno de los esquemas de control propuestos para escenarios futuros.

En lo que respecta a la estimación de la tasa por congestión, se tomó como referente la metodología usada en el documento “Guía sobre la implantación de una tasa por congestión en Barcelona” (Cano, 2004), en la cual se describen los costos del vehículo privado que son asumidos directamente por los conductores y/o propietarios de los vehículos y otros que pueden ser internalizados mediante la aplicación de tasas.

La tasa por congestión se entiende como el valor a pagar por los usuarios del vehículo particular de manera que permita internalizar los costos externos del transporte mencionados anteriormente. Para efectos del presente análisis y dada la restricción de información disponible, solo se tuvo en cuenta el costo de la congestión debido a los sobrecostos del tiempo de viaje. Así los sobrecostos de tiempo de viaje se relacionan con la medida de los retrasos producidos por circular a una velocidad menor que una velocidad de referencia, la que debe ser definida previamente cuando se presentan niveles de congestión.

Para determinar los sobrecostos del tiempo de viaje -  $S_{TV}$ , y con base en los resultados de la simulación microscópica de tráfico, se multiplicaron las demoras totales (expresadas en horas) por el valor subjetivo del tiempo en horas –  $VST$ .

$$S_{TV} = Demoras * VST$$

La tasa por congestión se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$T_c = S_{TV} * distancia\ del\ viaje$$

Donde,

$T_c$  es la tasa por congestión expresada en COP/km

$S_{TV}$  corresponde a los sobrecostos del tiempo de viaje

Igualmente se calculó la tasa por congestión expresada en Pesos Colombianos por Vehículo (COP/veh), a partir de la siguiente ecuación:

$$T_{C2} = T_c * D_m$$

Donde  $D_m$  es la distancia media y se obtiene de:

$$D_m = \frac{\text{Distancia del viaje}}{\text{Número de vehículos}}$$

Debido a que el objetivo es demostrar que la congestión puede cobrarse en términos monetarios o en espacio, se calculó el tiempo de demoras que serían necesarias para compensar la congestión que se causa a la sociedad por hacer uso del vehículo particular. Para ello se empleó la siguiente ecuación:

$$T_{C3} = T_{c2}/VST_k$$

Donde  $T_{C3}$  es la tasa por congestión expresada en minutos

$VST_k$  es el valor subjetivo del tiempo expresado en \$/minutos

Variable	Valor
Demoras totales (horas)	2.517,6
Valor Subjetivo del Tiempo (COP/hora) $VST$	16.826,0
Sobrecostos del tiempo de viaje (COP/hora) $S_{TV}$	42.359.931
Distancia media (km/veh) $D_m$	0,98
Tasa por congestión (COP/veh) $T_{c2}$	3.770
Tasa por congestión (minutos) $T_{c3}$	13,44

El resultado indica que para internalizar las externalidades por congestión generadas por el vehículo particular en el escenario base (situación actual) se debe implementar el cobro de una tasa por congestión o tarifa óptima por congestión de COP 3.770 o se debe implementar un esquema de control que genere un incremento del tiempo de viaje (demora adicional) de 13,44 minutos (806,40 segundos).

#### **5.6.4 Variación de la demanda de viajes**

Para estimar la variación de la demanda de viajes en vehículo particular en el mediano plazo derivados de la implementación de los diferentes instrumentos de gestión de la movilidad, se tomaron las elasticidades de la demanda de viajes en transporte privado respecto al costo generalizado del viaje presentadas en la guía “Cobros de Congestión en Ciudades Colombianas”, realizado por el University College London y la Universidad de los Andes en 2013 (UCL-Uniandes, 2013).

En dicho estudio se estimó la elasticidad promedio del uso del vehículo particular frente a la variación de su costo monetario para los grupos socioeconómicos de estratos bajos y altos, calculando el cambio en la probabilidad de utilizar el modo privado, generado por el cambio del componente monetario de la función de utilidad. La elasticidad estimada se encuentra en el rango (-0,7; -1,4). La elasticidad se entiende como un valor absoluto y el signo negativo obedece a la relación inversa existente entre la cantidad demandada y la variable analizada.

Cabe mencionar que en Colombia se usa un sistema de clasificación denominado Estratos Socio-Económicos, el cual clasifica las viviendas en 6 categorías o estratos, en

las cuales el estrato 1 es el más bajo y el estrato 6 es el más alto. Dicha clasificación no se basa en los ingresos de las familias sino en las características físicas de la vivienda, su entorno inmediato y su contexto urbano. El estrato es entendido como un indicador indirecto que da idea del nivel socio-económico de una familia que habita en una calle en particular, indicador que es usado por los organismos de los gobiernos locales, regionales y nacionales con el propósito de recaudar impuesto, tarificación y subsidio de servicios públicos y para el desarrollo de los programas de asistencia social.

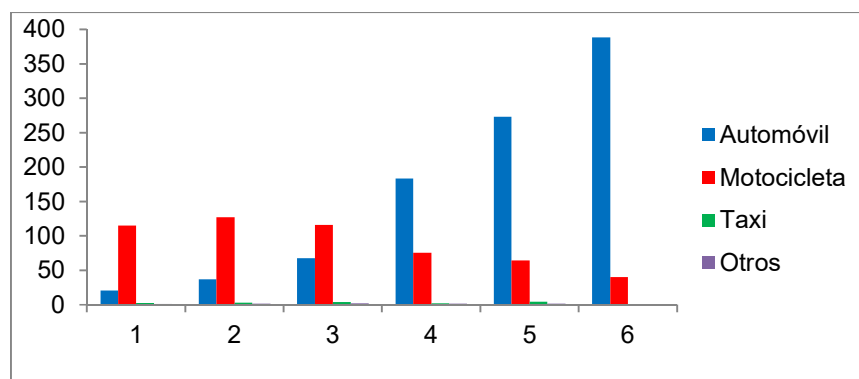
El estrato socio-económico es generalmente usado como variable proxy del ingreso familiar (Cantillo-García, Guzmán y Arellana, 2019). Para efectos prácticos de la presente investigación se han agrupado los estratos 1, 2 y 3 como estratos socio-económicos bajos y los estratos 4, 5 y 6 como estratos altos.

Así del rango estimado, el límite superior (-1,4) corresponde a la elasticidad para los estratos socioeconómicos bajos (1, 2 y 3) los cuales son más elásticos, es decir que ante incrementos en los costos monetarios del viaje, la demanda varía en una proporción más que proporcional a la variación del incremento, mientras que el límite inferior (-0,7) corresponde a la elasticidad de los estratos socioeconómicos altos (4, 5 y 6) cuya demanda de viajes en transporte privado reacciona de manera menos sensible ante incrementos en el costo monetario del viaje, influyendo así en las decisiones de viaje, cambio de modo de transporte o cambio de itinerario.

Cabe mencionar también que, según los datos de la Encuesta de Movilidad Cali Hogares de año 2015, son los estratos 4, 5 y 6 los que presentan una mayor tenencia de vehículo particular como se observa en la Figura 64, que muestra como a medida que aumenta el estrato se incrementa la tenencia de automóviles mientras que la tenencia de motocicletas disminuye, siendo mayor la tasa de motorización de motos en los estratos 1, 2 y 3.

La mayor tasa de motorización para automóvil está en el estrato 6 con 388,37 vehículos por 1.000 habitantes y la menor en el estrato 1 con 20,62 vehículos por 1.000 habitantes; mientras la mayor tasa de motorización para moto está en el estrato 2 con 127,29 veh/1000hab y la menor en el estrato 6 con 39,99 veh/1000hab.

Figura 64. Tasa de motorización por estratos (vehículos / 1000 habitantes)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Encuesta de Movilidad Cali 2015 (SDG & CNC, 2015)



Para efectos prácticos, en el presente análisis se optó por trabajar con la elasticidad promedio del rango, es decir, una elasticidad de -1,05, de esta manera se busca incluir no solo a los estratos económicos altos sino también a los bajos. Ese valor promedio del rango usado como referencia resulta suficiente para los fines del ejercicio realizado en la presente investigación, dejando como objeto de futuras investigaciones profundizar en la estimación de dicha elasticidad para el caso específico de Santiago de Cali en los diversos segmentos socio-económicos.

Una vez establecida la elasticidad se procede a estimar la potencial variación de la demanda de viajes en el mediano plazo derivada de la implementación de los esquemas de control (gestión de la movilidad) propuestos. Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$\Delta Q = \varepsilon * \Delta CGV$$

Donde,

$\Delta Q$  es la variación de la demanda de viajes en transporte privado

$\varepsilon$  es la elasticidad de la demanda de viajes en transporte privado

$\Delta CGV$  es la variación del costo generalizado del viaje

El costo generalizado del viaje, como se explicó anteriormente se compone de 2 elementos: un componente monetario (fijo) y un componente de tiempo de viaje (variable). El primero fue hallado con la metodología expuesta previamente, mientras que para el segundo, el software de simulación microscópica SYNCHRO-SIMTRAFFIC arroja resultados de demoras para cada uno de los escenarios propuestos asumiendo una demanda constante; dichas demoras se sumaron al tiempo promedio de viaje de la encuesta de movilidad Cali Hogares 2015 (44,22 minutos) y el resultado se multiplicó por el valor subjetivo del tiempo calculado en 280,43 COP/min, obteniendo así el componente variable de tiempo de viaje. Posteriormente se suman los 2 componentes: el monetario y el de tiempo de viaje para obtener el costo generalizado del viaje. Finalmente, para calcular las variaciones del costo generalizado del viaje se tomaron los costos de cada escenario y se compararon con el escenario base S2 (escenario actual con pico y placa de 2 dígitos).

Con los datos de elasticidad y variaciones del costo generalizado del viaje se hallaron las potenciales variaciones en la demanda de viajes en transporte privado cuyos resultados se presentan en la siguiente tabla.

Entre los resultados destaca la potencial reducción de un 14,4% de la demanda de viajes en transporte privado, derivada de la implementación del esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV+GCT).

Tabla 15. Variación de la Demanda de Viajes en Transporte Privado

Esquemas propuestos	Variación de la Demanda en el mediano plazo (Elasticidad -1,05)
Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV)	-1,92%
Gestión y Control del Tráfico (GCT)	-4,9%
Esquema híbrido: Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV+GCT)	-14,4%
Esquema híbrido: Redistribución del Uso del Espacio Viario y Restricción de la Circulación Vehicular (RUEV+RCV)	2,4%
Esquema híbrido: Redistribución del Uso del Espacio Viario, Gestión y Control del Tráfico y Restricción de la Circulación Vehicular (RUEV+GCT+RCV)	-5,2%

*Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la ULC-Uniandes (2013)*

Nótese que en el mediano plazo con la implementación del esquema híbrido RUEV+RCV se mejoran los tiempos de viaje, lo que a su vez se traduce en una disminución del costo generalizado del viaje, debido a que dicho esquema híbrido incluye una restricción de circulación para un 20% adicional del parque automotor con respecto al escenario base (situación actual).

Conforme a la teoría económica, dicha reducción en el costo generalizado del viaje se reflejaría en un incremento de la demanda, sin embargo, la demanda de vehículos particulares que ingresarían al Centro Histórico no podría verse incrementada debido a que la restricción de circulación les prohíbe hacer uso del vehículo particular. Por ello, en la práctica no es posible que dicho efecto de incremento de viajes se materialice.

## **5.7 Implementación de la Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV)**

### **5.7.1 Situación actual**

El Centro Histórico cuenta con una red vial de 12,28 km (longitud de eje vial), los cuales expresados en kilómetros de carril de calzada vehicular son 27,36 km.

La Figura 65 muestra el uso de la calzada vehicular en el escenario base o situación actual. El carril mixto (para modos de transporte privado) tiene la mayor participación en la distribución del uso de dichos kilómetros de carril. Del total de 27,36 km de carril se destinan 23,91 km al carril mixto, 1,90 km al carril bus, 1,44 km al carril peatonal, 0,12 km al carril semi-peatonal y 0,00 km al carril bici. La distribución porcentual es del 87,38% para el carril mixto, 6,94% para el carril bus, 5,26% para el carril peatonal, 0,42% para el carril semi-peatonal y el 0,00% para el carril bici.

De igual manera, la Tabla 16 muestra que de los 17 corredores viales que comprenden la red vial del Centro Histórico (10 corredores viales norte-sur denominados calles y 7 corredores viales este-oeste denominados carreras) solo 3 tienen carriles destinados a los modos no motorizados (peatón y bicicleta) y al transporte público.

### **5.7.2 Identificación de proyectos**

Para la identificación de los proyectos de Redistribución de Uso del Espacio Viario RUEV en el Centro Histórico se tuvo como insumo lo establecido en el Plan Integral de Movilidad Urbana PIMU Visión 2030 (adoptado en 2019). Con base en esto, los corredores viales a intervenir se dividieron en 18 tramos, los cuales para efectos prácticos en el marco del presente documento se entenderán como 18 proyectos RUEV.

La Figura 66 permite visualizar el nivel de transformación que sufren los corredores viales y cada uno de sus tramos, a consecuencia de la implementación de los proyectos RUEV. Los niveles de transformación incluyen leve, moderado y profundo.

En primer lugar, la absoluta mayoría de las transformaciones son de nivel moderado, en total 15 proyectos. En segundo lugar, las transformaciones de nivel profundo, si bien son significativamente menores, resultan destacables en tanto que logran configurar un itinerario en forma de T, con base en 2 proyectos. En tercer lugar, las transformaciones de nivel leve se limitan a un único proyecto.

De igual manera, la Tabla 17 permite ver que en la mayoría de los casos de intervenciones moderadas se trata de corredores viales con 2 y 3 carriles mixtos (para modos de transporte privado) a los cuales se les reduce 1 carril.

### **5.7.3 Situación futura**

En el escenario futuro (situación futura deseada), se incluye la implementación de los 18 proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV

Así, en este escenario, la red vial de 12,28 km (longitud de eje vial) del Centro Histórico se expresa en términos de 41,41 km de carril.

El carril peatonal tiene la mayor participación en la distribución del uso de dichos kilómetros de carril. Del total de 41,41 km de carril se destinan 21,88 km al carril peatonal, 14,54 km al carril mixto (para modos de transporte privado), 2,97 km al carril bici, 1,90 km al carril bus y 0,12 km al carril semi-peatonal. La distribución porcentual es de 52,85% para el carril peatonal, 35,11% para el carril mixto, 7,18% para el carril bici, 4,58% para el carril bus y 0,28% para el carril semi-peatonal.

De los 17 corredores viales que comprenden la red vial del Centro Histórico 15 tienen carriles destinados a los modos no motorizados (peatón y bicicleta) y al transporte público.

Figura 65. Situación actual (sin proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular

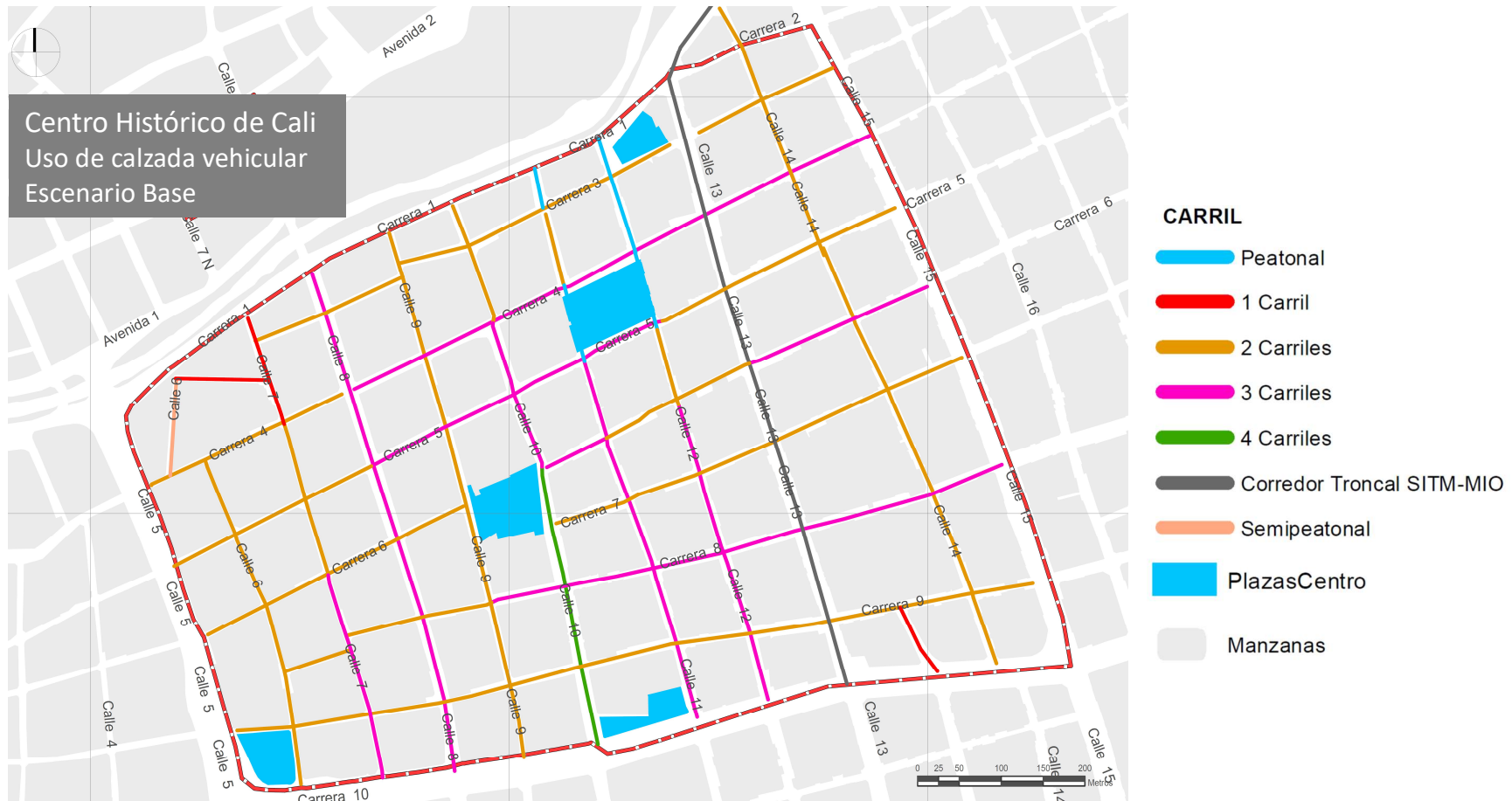


Tabla 16. Situación actual (sin proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular

Nombre	Carril Peatonal (Km)	Carril Bici (Km)	Carril Bus (Km)	Carril Semi-peatonal (Km)	Carril Mixto (Km)	Totales de Carril (Km)	Totales de Eje de Vía (Km)
Calle 10	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	2,02	0,67
Calle 11	0,72	0,00	0,00	0,00	1,08	1,80	0,68
Calle 12	0,72	0,00	0,00	0,00	1,12	1,85	0,71
Calle 13	0,00	0,00	1,90	0,00	0,00	1,90	0,95
Calle 13a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,09
Calle 14	0,00	0,00	0,00	0,00	1,71	1,71	0,86
Calle 6	0,00	0,00	0,00	0,12	0,81	0,93	0,52
Calle 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,86	0,57
Calle 8	0,00	0,00	0,00	0,00	1,86	1,86	0,62
Calle 9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	1,30	0,65
Carrera 3	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	1,67	0,84
Carrera 4	0,00	0,00	0,00	0,00	2,22	2,22	0,94
Carrera 5	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28	2,28	0,96
Carrera 6	0,00	0,00	0,00	0,00	1,94	1,94	0,85
Carrera 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,79	0,79	0,52
Carrera 8	0,00	0,00	0,00	0,00	2,22	2,22	0,89
Carrera 9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,94	1,94	0,97
<b>Totales</b>	<b>1,44</b>	<b>0,00</b>	<b>1,90</b>	<b>0,12</b>	<b>23,91</b>	<b>27,36</b>	<b>12,28</b>

Figura 66. Proyectos de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) según nivel de transformación

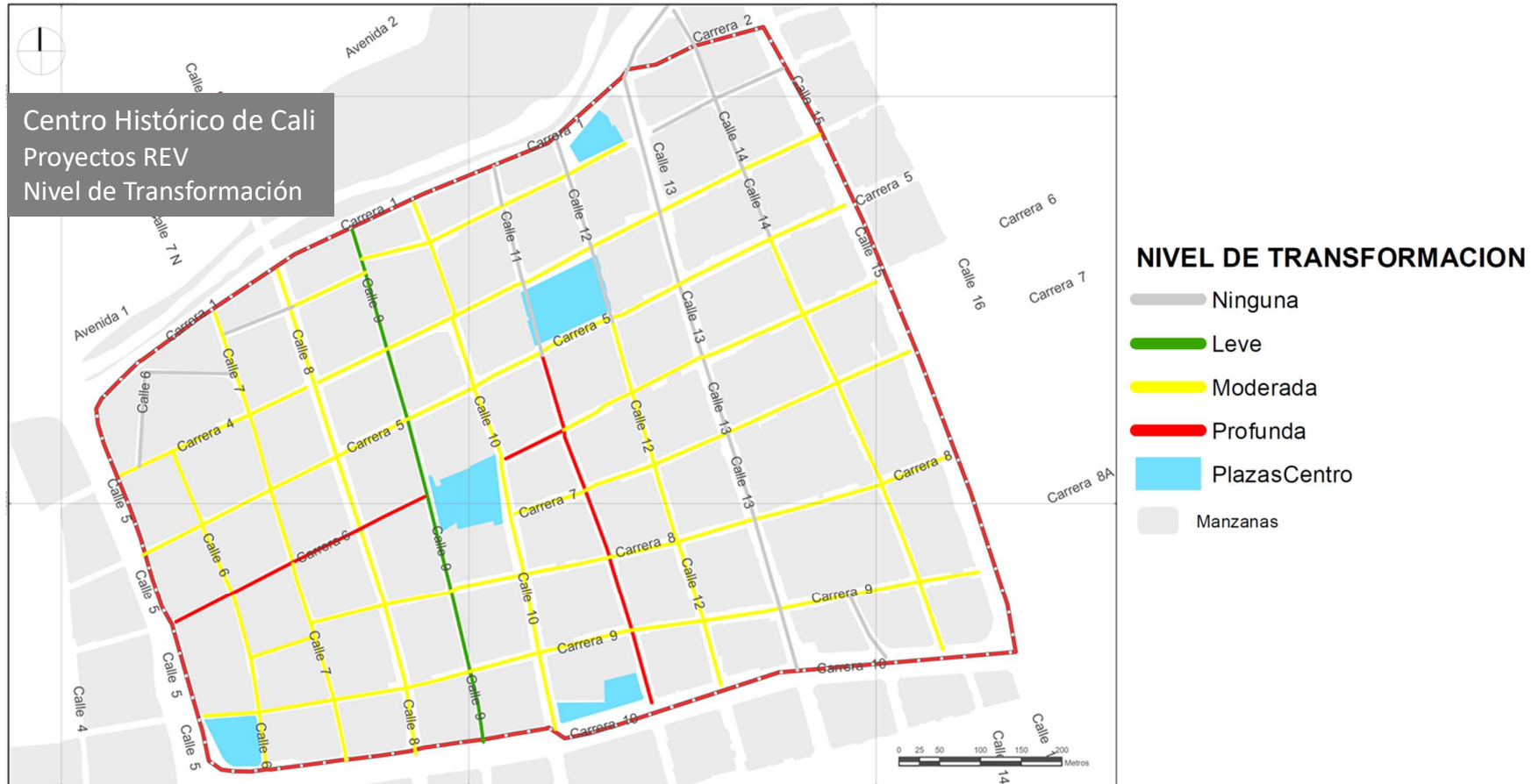


Tabla 17. Listado de proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV)

Corredores viales por tramos	Uso Actual de la Calzada Vehicular	Uso Propuesto de la Calzada Vehicular	Nivel de Transformación	Descripción de la Intervención
Proyecto - Tramo 1: Calle 6 entre carreras 4 y 10	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (2,5 carriles peatón)
Proyecto - Tramo 2*: Calle 7 entre carreras 1 a 10	Sección variable de 1 y 2 Carriles Mixtos (1,5 carriles)	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (1,25 carril peatón)
Proyecto - Tramo 3: Calle 8 entre carreras 1 y 10	2, 3 y 4 Carriles Mixtos (3 carriles)	2 Carriles Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (1,5 carril peatón), Carril bici (1 carril bici)
Proyecto - Tramo 4: Calle 9 entre carreras 1 y 10	2 Carriles Mixtos	2 Carriles Mixto	Leve	Ampliación de aceras (0,5 carril peatón)
Proyecto - Tramo 5: Calle 10 entre carreras 1 y 10	3 Carriles Mixtos	2 Carriles Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (2,5 carriles peatón)
Proyecto - Tramo 6: Calle 11 entre carreras 5 y 10	2 Carriles Mixtos	0 Carriles Mixto	Profunda	Peatonalización (4 carriles peatón), carril bici (1 carril bici)
Proyecto - Tramo 7: Calle 12 entre carreras 5 y 10	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (2,5 carriles peatón)
Proyecto - Tramo 8: Calle 14 entre carreras 5 y 10	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (2,5 carriles peatón)
Proyecto - Tramo 9: Carrera 3 entre calles 8 y 13	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (2,5 carriles peatón)
Proyecto - Tramo 10: Carrera 4 entre calles 15 y 8	Sección variable de 2 y 3 Carriles Mixtos (2,5 carriles)	2 Carriles Mixtos	Moderada	Ampliación de aceras (0,25 carril peatón), Carril bici (1 carril bici)
Proyecto - Tramo 11: Carrera 4 entre calles 8 y 5	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (1,5 carril peatón), Carril bici (1 carril bici)





*Redistribución del uso del espacio viario  
como gestor eficiente de la movilidad*



Proyecto - Tramo 12: Carrera 5 entre calles 5 y 8	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (1,25 carril peatón), Carril bici (1 carril bici)
Proyecto - Tramo 13: Carrera 5 entre calles 8 y 15	Sección variable de 2 y 3 Carriles Mixtos (2,5 carriles)	2 Carriles Mixtos	Moderada	Ampliación de aceras (0,25 carril peatón), Carril bici (1 carril bici)
Proyecto - Tramo 14: Carrera 6 entre calles 5 y 11	2 Carriles Mixtos	0 Carril Mixto	Profunda	Peatonalización (5 carriles peatón)
Proyecto - Tramo 15: Carrera 6 entre calles 11 y 15	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (2,5 carril peatón)
Proyecto - Tramo 16: Carrera 7 entre calles 10 y 15	Sección variable de 1 y 2 Carriles Mixtos (1,5 carriles)	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (1,25 carril peatón)
Proyecto - Tramo 17: Carrera 8 entre calles 8 y 15	Sección variable de 2 y 3 Carriles Mixtos (2,5 carriles)	2 Carriles Mixtos	Moderada	Ampliación de aceras (1,25 carril peatón)
Proyecto - Tramo 18: Carrera 9 entre calles 5 y 15	2 Carriles Mixtos	1 Carril Mixto	Moderada	Ampliación de aceras (2,5 carril peatón)

Figura 67. Situación futura (con proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular

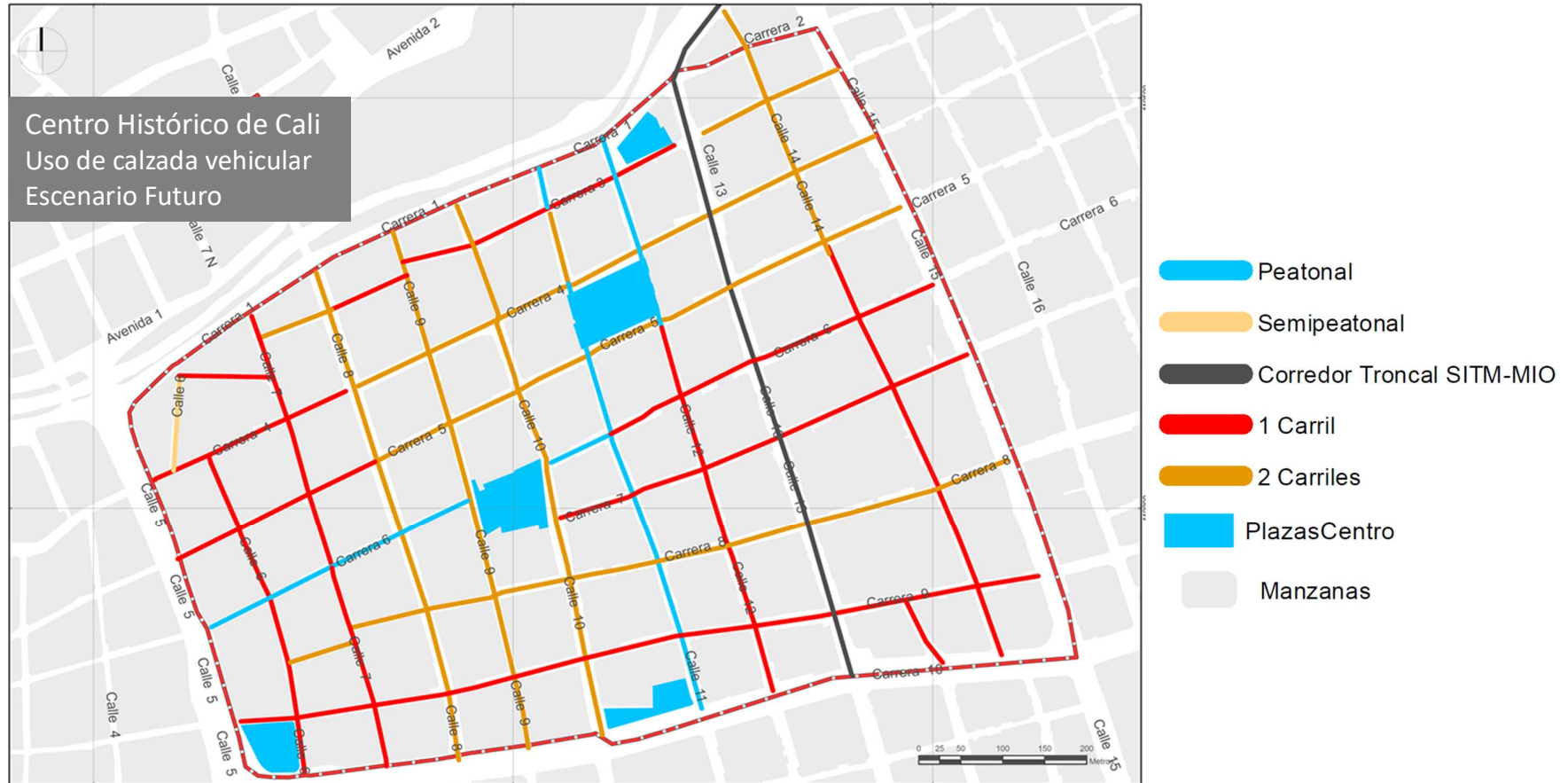


Tabla 18. Situación futura (con proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario -RUEV-): Uso de la calzada vehicular

Nombre	Carril Peatonal (Km)	Carril Bici (Km)	Carril Bus (Km)	Carril Semi-peatonal (Km)	Carril Mixto (Km)	Totales de Carril (Km)	Totales de Eje de Vía (Km)
Calle 10	1,68	0,00	0,00	0,00	1,35	3,03	0,67
Calle 11	2,51	0,45	0,00	0,00	0,18	3,15	0,68
Calle 12	2,13	0,00	0,00	0,00	0,56	2,69	0,71
Calle 13	0,00	0,00	1,90	0,00	0,00	1,90	0,95
Calle 13a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,09
Calle 14	2,14	0,00	0,00	0,00	0,86	2,99	0,86
Calle 6	1,01	0,00	0,00	0,12	0,41	1,53	0,52
Calle 7	0,72	0,00	0,00	0,00	0,57	1,29	0,57
Calle 8	0,93	0,62	0,00	0,00	1,24	2,79	0,62
Calle 9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	1,30	0,65
Carrera 3	1,86	0,00	0,00	0,00	0,93	2,78	0,84
Carrera 4	0,55	0,94	0,00	0,00	1,63	3,12	0,94
Carrera 5	0,57	0,96	0,00	0,00	1,66	3,20	0,96
Carrera 6	3,60	0,00	0,00	0,00	0,50	4,11	0,85
Carrera 7	0,66	0,00	0,00	0,00	0,52	1,18	0,52
Carrera 8	1,11	0,00	0,00	0,00	1,78	2,89	0,89
Carrera 9	2,42	0,00	0,00	0,00	0,97	3,39	0,97
Totales	21,88	2,97	1,90	0,12	14,54	41,41	12,28

**Notas:**

Asumiendo carril (o franja de circulación) de peatón de 1,2 metros según MECEP (2010) “Manual de Diseño y Construcción de Elementos Constitutivos del Espacio Público”

Asumiendo que 1 carril mixto equivale a 2,5 carriles peatón o 2,5 carriles bici

Asumiendo valor promedio en corredores con sección variable, de manera que 0,5 carriles mixtos menos equivalen a 1,25 carriles peatón o bici

Figura 68. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Carrera 4 entre Calles 14 y 15  
Fuente: DAPM, Alcaldía de Cali (2016b). Propuestas de intervención en el Centro Histórico de Cali.

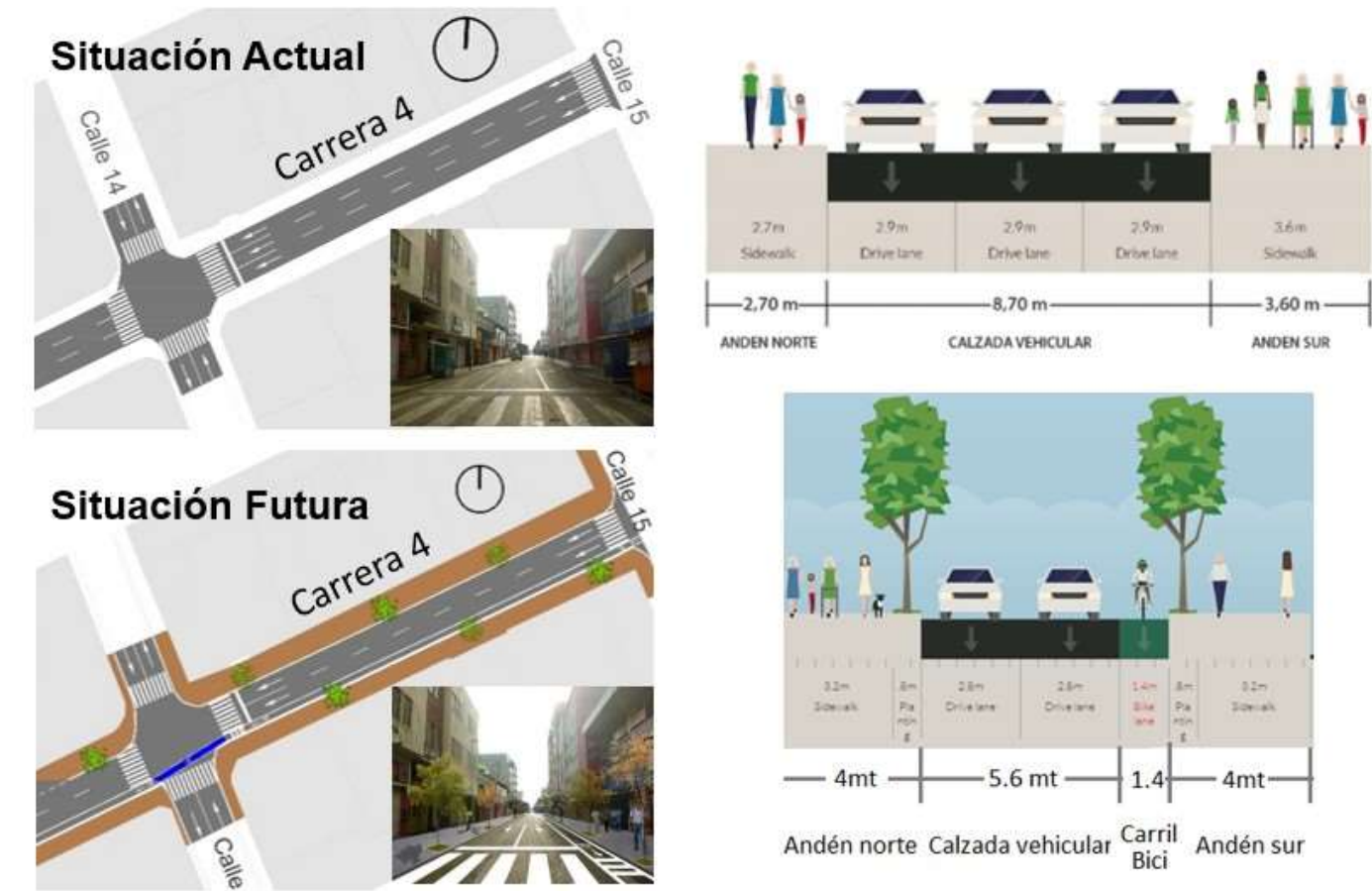


Figura 69. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Carrera 5 entre Calles 8 y 9  
Fuente: DAPM, Alcaldía de Cali (2016b). Propuestas de intervención en el Centro Histórico de Cali.



Figura 70. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Calle 8 entre Carreras 3 y 5  
Fuente: DAPM, Alcaldía de Cali (2016b). Propuestas de intervención en el Centro Histórico de Cali.

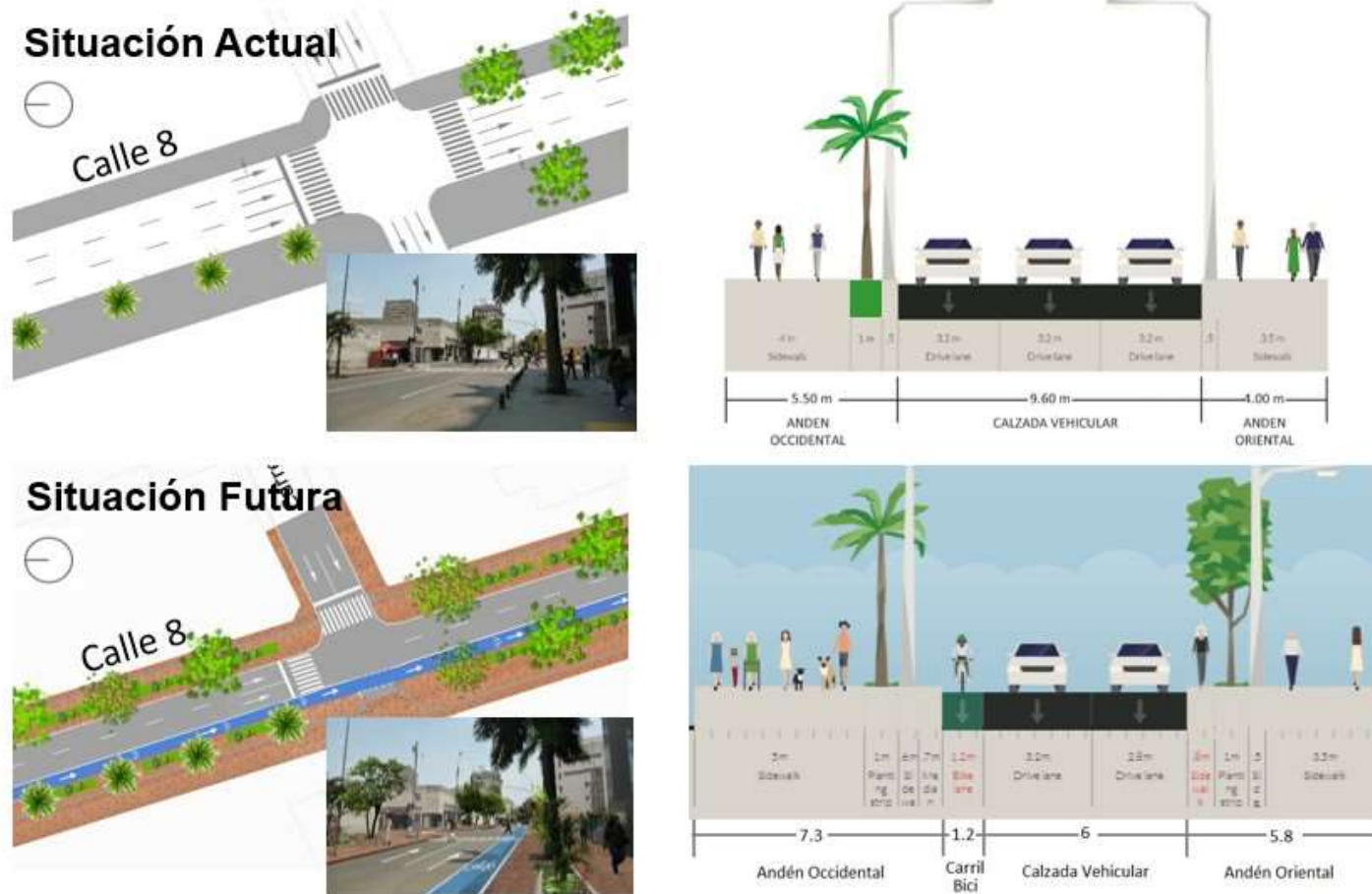


Figura 71. Proyecto de Redistribución de Uso del Espacio Viario (RUEV) en Calle 10 entre Carreras 4 y 5  
Fuente: DAPM, Alcaldía de Cali (2016b). Propuestas de intervención en el Centro Histórico de Cali



## 5.8 Análisis de escenarios

### 5.8.1 Listado de indicadores

En los 8 escenarios se analizan variables relacionadas con las condiciones urbanísticas, operacionales del tráfico, externalidades ambientales por emisiones contaminantes y uso de combustible y externalidades económicas por congestión. Para ello, se usan diversos indicadores los cuales se listan a continuación:

- **Los indicadores urbanísticos:** Expresan la distribución del espacio viario de la calzada vehicular entre los diferentes modos de transporte, con base en los kilómetros (km) destinados a las tipologías de infraestructura que corresponden a cada uno de los modos.
  - Carril peatonal: Kilómetros de carril destinado de manera exclusiva a peatones (km)
  - Carril semi-peatonal: Kilómetros de carril con prioridad al peatón en coexistencia con otros modos (km)
  - Carril bici: Kilómetros de carril destinado de manera exclusiva a la bicicleta (km)
  - Carril bus: Kilómetros de carril destinado de manera exclusiva al transporte público en bus (km)
  - Carril mixto: Kilómetros de carril destinado al tráfico mixto de vehículos de transporte privado (km)
- **Los indicadores de tráfico:** Expresan las principales características de las condiciones de flujo vehicular relacionadas con demoras, distancias, tiempo de viaje y velocidades.
  - Demora total (horas),
  - Demora por vehículo (segundos)
  - Distancia de viaje total (kilómetros)
  - Tiempo de viaje total (horas)
  - Velocidad promedio total (kilómetros por hora).
- **Los indicadores ambientales:** Expresan las externalidades negativas o impacto ambiental de la movilidad en términos de emisiones contaminantes y uso de combustible.
  - Emisiones de Hidrocarburos no quemados HC (gramos)
  - Emisiones de Monóxido de Carbono CO (gramos)
  - Emisiones de Óxido de Nitrógeno NOx (gramos),
  - Consumo de combustible (litros)
  - Eficiencia en el uso del combustible (kilómetros por litro),
- **Los indicadores económicos:** Expresan el costo económico de las demoras por congestión.
  - Costo económico de la congestión (pesos colombianos)



## **5.8.2 Análisis de resultados**

### *5.8.2.1 Indicadores urbanísticos*

En el escenario base o situación actual, el centro histórico cuenta con una red vial de 12,28 km (longitud de eje vial), los cuales expresados en kilómetros de carril de calzada vehicular son 27,36 km.

El carril mixto (para modos de transporte privado) tiene la mayor participación en la distribución del uso de dichos kilómetros de carril. Del total de 27,36 km de carril se destinan 23,91 km al carril mixto, 1,90 km al carril bus, 1,44 km al carril peatonal, 0,12 km al carril semi-peatonal y 0,00 km al carril bici. La distribución porcentual es del 87,38% para el carril mixto, 6,94% para el carril bus, 5,26% para el carril peatonal, 0,42% para el carril semi-peatonal y el 0,00% para el carril bici.

De los 17 corredores viales que comprenden la red vial del Centro Histórico (10 corredores viales norte-sur denominados calles y 7 corredores viales este-oeste denominados carreras) solo 3 tienen carriles destinados a los modos no motorizados (peatón y bicicleta) y al transporte público.

En el escenario futuro (situación futura deseada), se incluye la implementación de los 18 proyectos de intervención de Redistribución del Uso del Espacio Viario RUE que fueron identificados en el apartado 5.7 del presente documento.

Así, en este escenario, la red vial de 12,28 km (longitud de eje vial) del Centro Histórico se expresa en términos de 41,41 km de carril.

El carril peatonal tiene la mayor participación en la distribución del uso de dichos kilómetros de carril. Del total de 41,41 km de carril se destinan 21,88 km al carril peatonal, 14,54 km al carril mixto (para modos de transporte privado), 2,97 km al carril bici, 1,90 km al carril bus y 0,12 km al carril semi-peatonal. La distribución porcentual es de 52,85% para el carril peatonal, 35,11% para el carril mixto, 7,18% para el carril bici, 4,58% para el carril bus y 0,28% para el carril semi-peatonal.

De los 17 corredores viales que comprenden la red vial del Centro Histórico 15 tienen carriles destinados a los modos no motorizados (peatón y bicicleta) y al transporte público.

De esta manera, se pasa de un escenario base con una distribución del uso del espacio viario orientado al transporte privado (donde la mayor participación la tiene el carril mixto para el transporte privado con un 87,4% y el restante 12,6% la tienen los carriles para los modos de transporte sostenible) a un escenario futuro deseable con una distribución orientada a los modos más sostenibles (donde el carril mixto para transporte privado pasa a tener un 35,1% y los modos de transporte sostenible tienen la mayor con un 64,9%).

Figura 72. Escenario base: Kilómetros de carril por modo y corredor viario (km)

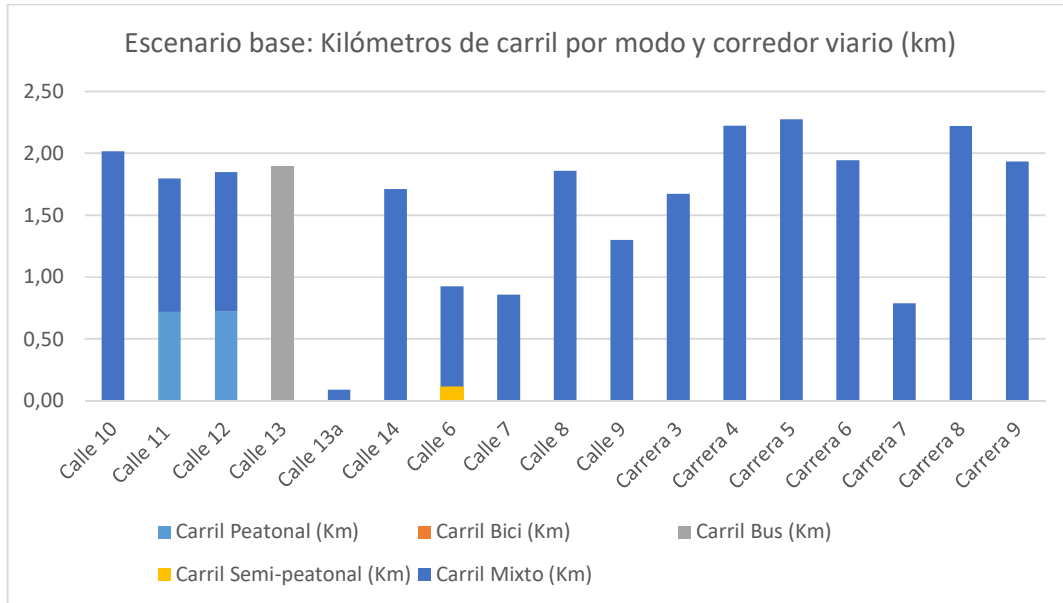


Figura 73. Escenario futuro: Kilómetros de carril por modo y corredor viario (km)

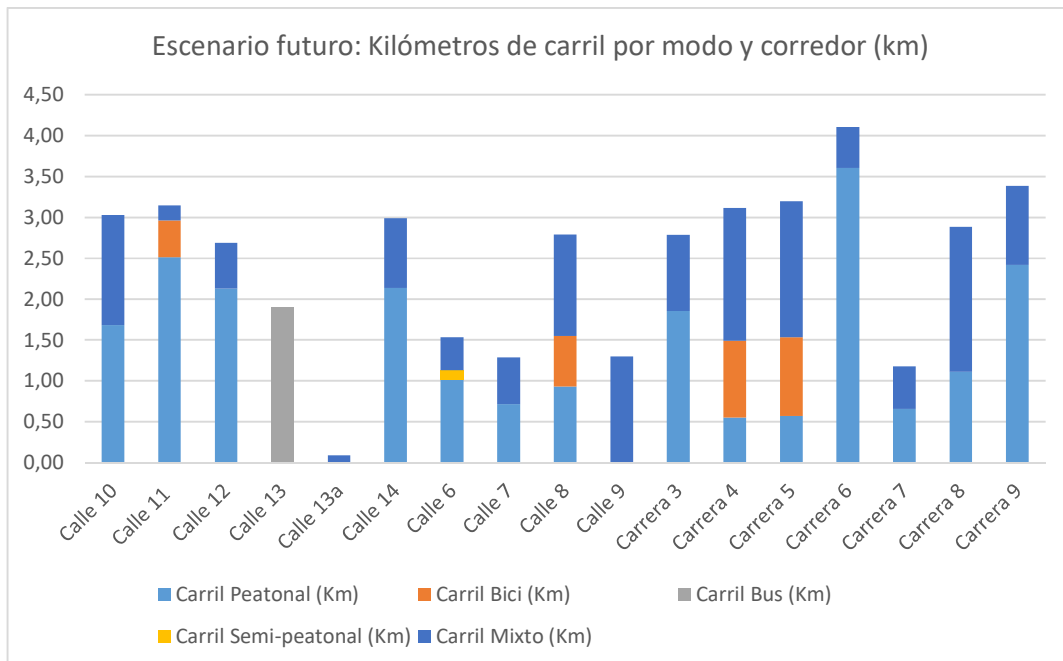


Figura 74. Escenario base: Reparto porcentual de carriles por modo (%)

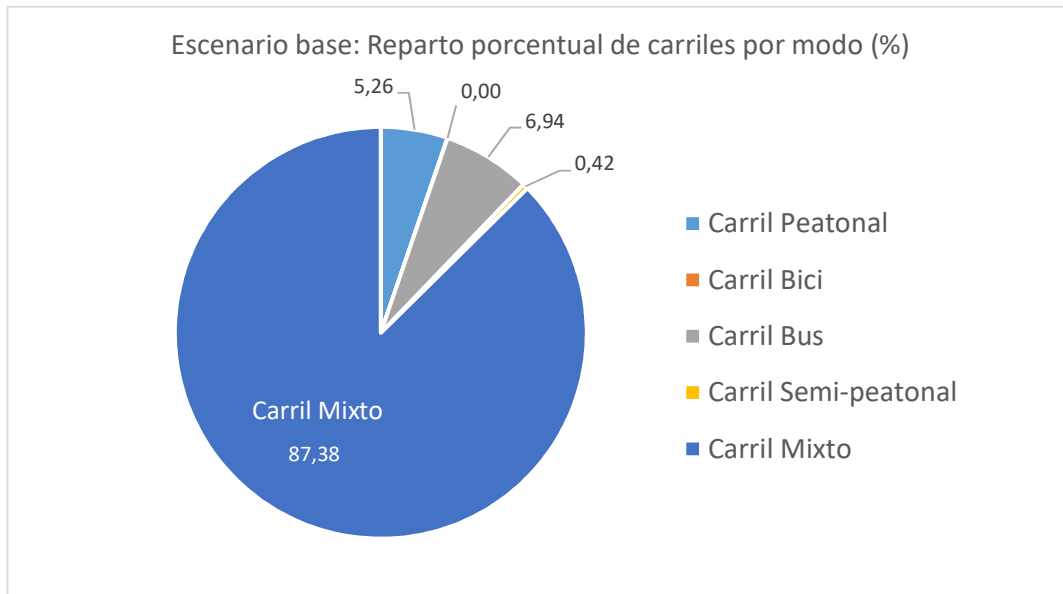


Figura 75. Escenario futuro: Reparto porcentual de carriles por modo (%)

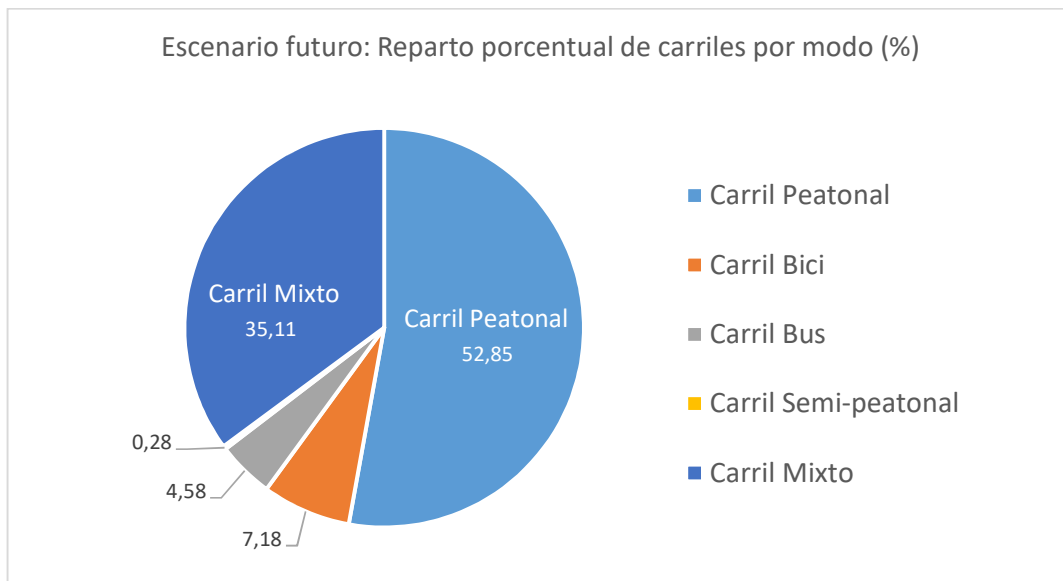


Figura 76. Escenarios base y futuro: Kilómetros de carril por modo (km)

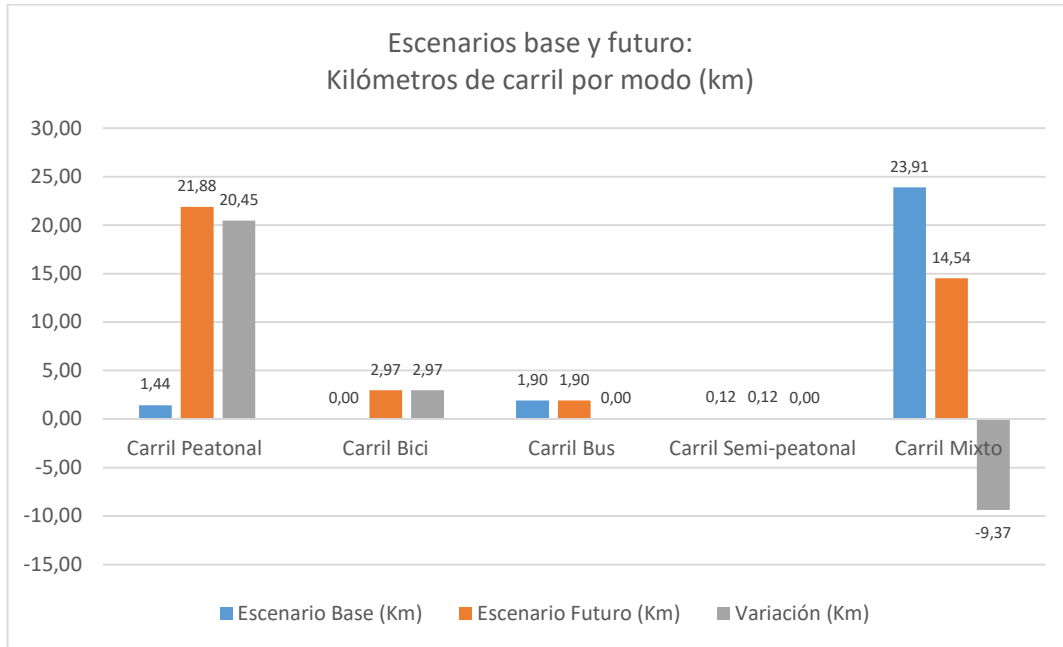


Figura 77. Escenarios base y futuro: Reparto porcentual de carriles por modo (%)

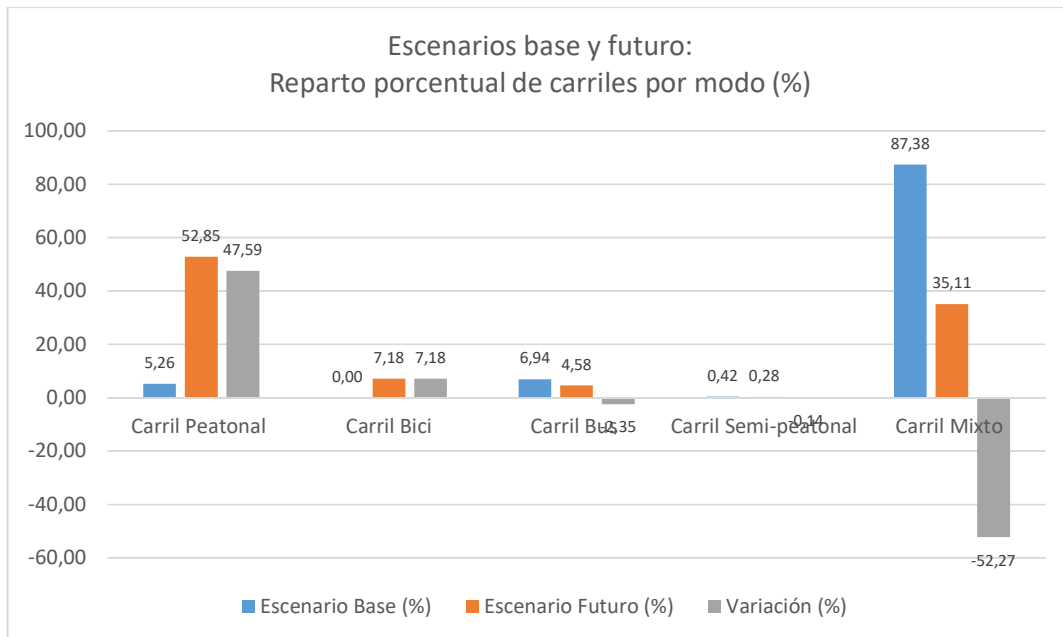


Tabla 19. Escenario base (sin proyectos RUEV): Kilómetros de carril de la calzada vehicular por modo de transporte y corredor viario

Nombre	Carril Peatonal (km)	Carril Bici (km)	Carril Bus (km)	Carril Semi-peatonal (km)	Carril Mixto (km)	Totales de Carril (km)	Totales de Eje de Vía (km)
Calle 10	0,00	0,00	0,00	0,00	2,02	2,02	0,67
Calle 11	0,72	0,00	0,00	0,00	1,08	1,80	0,68
Calle 12	0,72	0,00	0,00	0,00	1,12	1,85	0,71
Calle 13	0,00	0,00	1,90	0,00	0,00	1,90	0,95
Calle 13a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,09
Calle 14	0,00	0,00	0,00	0,00	1,71	1,71	0,86
Calle 6	0,00	0,00	0,00	0,12	0,81	0,93	0,52
Calle 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	0,86	0,57
Calle 8	0,00	0,00	0,00	0,00	1,86	1,86	0,62
Calle 9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	1,30	0,65
Carrera 3	0,00	0,00	0,00	0,00	1,67	1,67	0,84
Carrera 4	0,00	0,00	0,00	0,00	2,22	2,22	0,94
Carrera 5	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28	2,28	0,96
Carrera 6	0,00	0,00	0,00	0,00	1,94	1,94	0,85
Carrera 7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,79	0,79	0,52
Carrera 8	0,00	0,00	0,00	0,00	2,22	2,22	0,89
Carrera 9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,94	1,94	0,97
Totales	1,44	0,00	1,90	0,12	23,91	27,36	12,28

Tabla 20. Escenario futuro (con proyectos RUEV): Kilómetros de carril de la calzada vehicular por modo de transporte y corredor viario

Nombre	Carril Peatonal (km)	Carril Bici (km)	Carril Bus (km)	Carril Semi-peatonal (km)	Carril Mixto (km)	Totales de Carril (km)	Totales de Eje de Vía (km)
Calle 10	1,68	0,00	0,00	0,00	1,35	3,03	0,67
Calle 11	2,51	0,45	0,00	0,00	0,18	3,15	0,68
Calle 12	2,13	0,00	0,00	0,00	0,56	2,69	0,71
Calle 13	0,00	0,00	1,90	0,00	0,00	1,90	0,95
Calle 13a	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	0,09
Calle 14	2,14	0,00	0,00	0,00	0,86	2,99	0,86
Calle 6	1,01	0,00	0,00	0,12	0,41	1,53	0,52
Calle 7	0,72	0,00	0,00	0,00	0,57	1,29	0,57
Calle 8	0,93	0,62	0,00	0,00	1,24	2,79	0,62
Calle 9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	1,30	0,65
Carrera 3	1,86	0,00	0,00	0,00	0,93	2,78	0,84
Carrera 4	0,55	0,94	0,00	0,00	1,63	3,12	0,94
Carrera 5	0,57	0,96	0,00	0,00	1,66	3,20	0,96
Carrera 6	3,60	0,00	0,00	0,00	0,50	4,11	0,85
Carrera 7	0,66	0,00	0,00	0,00	0,52	1,18	0,52
Carrera 8	1,11	0,00	0,00	0,00	1,78	2,89	0,89
Carrera 9	2,42	0,00	0,00	0,00	0,97	3,39	0,97
Totales	21,88	2,97	1,90	0,12	14,54	41,41	12,28

Carril  
Peatonal

### 5.8.2.2 Indicadores de tráfico

En este apartado se presentan los resultados del comportamiento de los principales indicadores de tráfico en los 8 escenarios analizados. Dichos resultados hacen referencia a la Hora de Mayor Demanda (HMD) de un día típico.

#### Las demoras

La demora total y la demora por vehículo en el Escenario Base (Esc\_1: Situación actual) 'es de 2.517,6 horas y 772,1 segundos, respectivamente.

El valor de estos indicadores se incrementa en la mayoría de los escenarios futuros propuestos, como es el caso de los escenarios futuros Esc\_2 (Redistribución del Uso del Espacio Viario, RUEV), Esc\_3 (Gestión y Control del Tráfico, GCT), y Esc\_5a (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico, RUEV+GCT). El mayor incremento se presenta en el escenario futuro Esc\_5a (RUEV+GCT), en el cual la demora total es de 4.427,9 horas y la demora por vehículo es de 1.945,4 segundos

Por el contrario, el valor de estos indicadores decrece en los escenarios futuros Esc\_4 (Restricción de Circulación Vehicular, RCV), Esc\_6 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+RCV), y Esc\_7 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario, Gestión y Control del Tráfico y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+GCT+RCV). El valor más bajo se presenta en el escenario futuro Esc\_4 (RCV), en el cual la demora total es de 1.250,8 horas y la demora por vehículo 438,5 segundos.

Los 3 escenarios futuros que presentan reducción en el valor de los indicadores de demora incluyen el instrumento RCV, dado que su acción directa es reducir el número de vehículos circulando en la red, por tanto, su mayor impacto se da cuando es el instrumento único de un escenario y, por el contrario, su menor impacto se da cuando tiene la menor participación en un esquema híbrido con otros instrumentos.

#### La distancia de viaje

La distancia de viaje total (o distancia recorrida total) en el Escenario Base '(Esc\_1: Situación actual) de 11.027,0 km. El valor de este indicador decrece en todos los escenarios futuros propuestos. El valor más bajo se presenta en el escenario futuro Esc\_5a (RUEV+GCT), con 6.075,4 km.

#### El tiempo de viaje

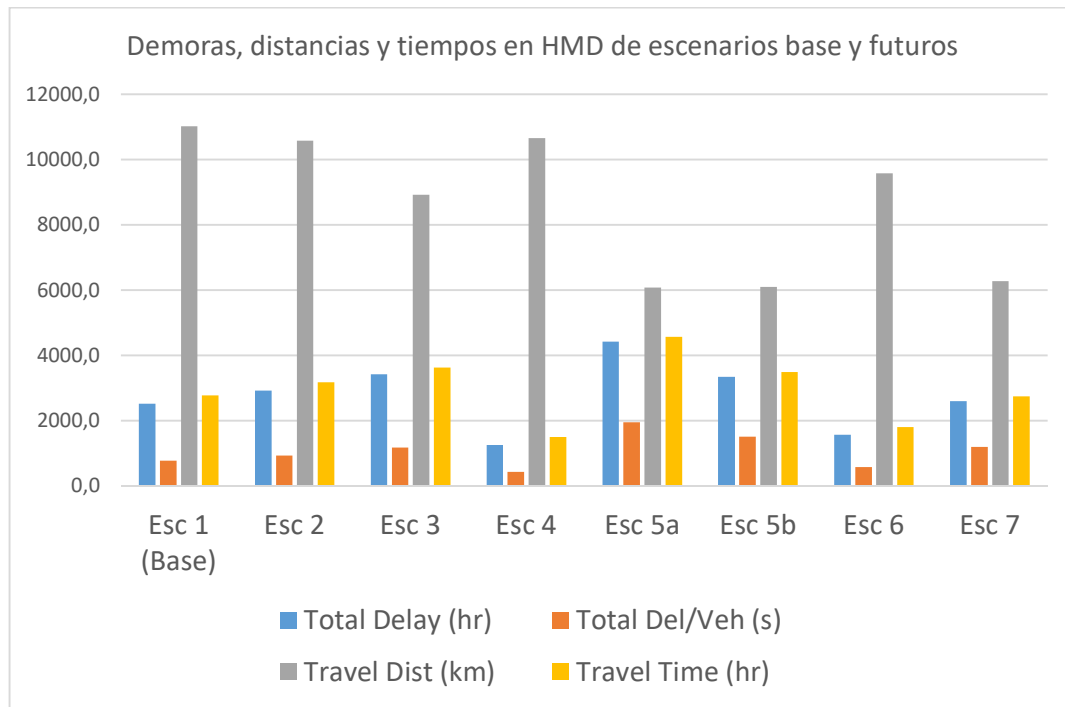
El tiempo de viaje total en el Escenario Base '(Esc\_1: Situación actual) es de 2.775,8 horas. El valor de este indicador se incrementa en los escenarios futuros Esc\_2 (RUEV), Esc\_3 (GCT) y Esc\_5a (RUEV+GCT); el valor más alto se presenta en el escenario futuro Esc\_5a (RUEV+GCT) con 4.570,7 horas.

Por el contrario, decrece en los escenarios futuros que incluyen el instrumento RCV, como es el caso de los escenarios Esc\_4 (RCV), Esc\_6 (RUEV+RCV) y Esc\_7 (RUEV+GCT+RCV); el valor más bajo se presenta en el escenario futuro Esc\_4 (RCV) con 1.501,0 horas.

La velocidad promedio

La velocidad promedio en el Escenario Base (Esc\_1: Situación actual) es de 10,0 km/h. El valor de este indicador decrece en los escenarios futuros Esc\_2 (RUEV), Esc\_3 (GCT), Esc\_5a (RUEV+GCT) y Esc\_7 (RUEV+GCT+RCV); el valor más bajo se presenta en el escenario futuro Esc\_5a (RUEV+GCT) con 4 km/h. Por el contrario, se incrementa en el escenario futuro Esc\_4 (RCV), cuyo valor es 16,0 km/h.

Figura 78. Demoras, distancias y tiempos en HMD de escenarios base y futuros



Esc_1	Escenario Base (Situación actual).	Corto plazo.
Esc_2	Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV).	Corto plazo.
Esc_3	Gestión y Control del Tráfico (GCT).	Corto plazo.
Esc_4	Restricción de Circulación Vehicular (RCV).	Corto plazo.
Esc_5a	Híbrido: RUEV + GCT.	Corto plazo.
Esc_5b	Híbrido: RUEV + GCT (elasticidad -1,05)	Mediano plazo.
Esc_6	Híbrido: RUEV + RCV	Corto plazo.
Esc_7	Híbrido: RUEV+GCT+RCV	Corto plazo.



Figura 79. Velocidad promedio en HMD en escenarios base y futuros (km/h)

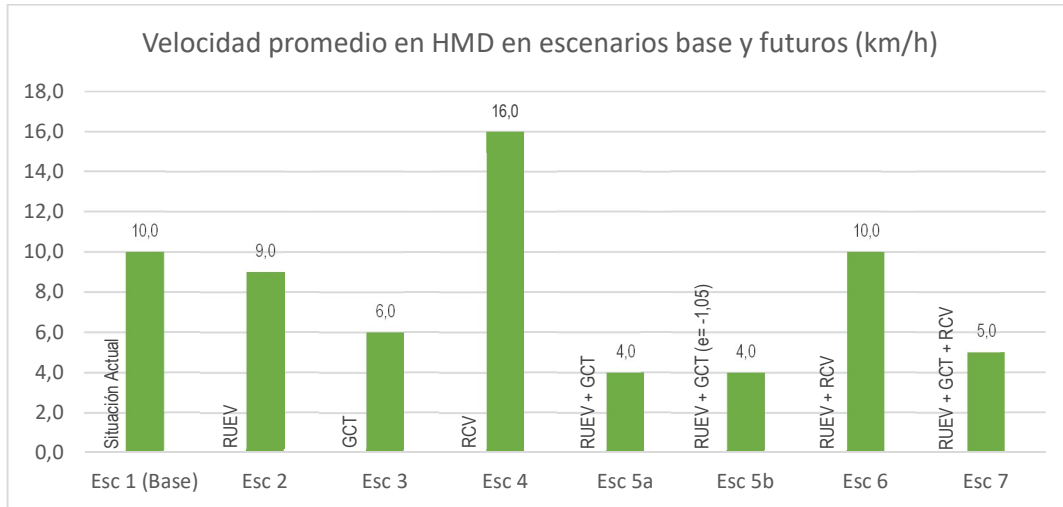


Figura 80. Variación de indicadores de tráfico en HMD en escenario futuros (Porcentaje %)

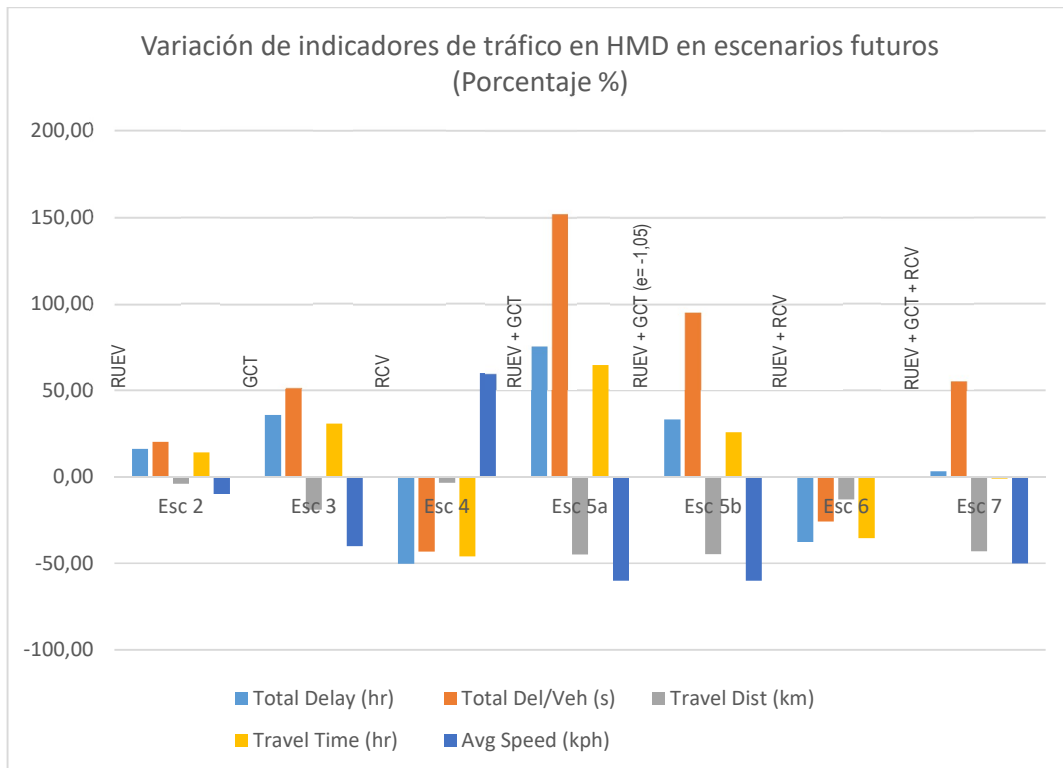


Tabla 21. Indicadores de tráfico en Hora de Mayor Demanda (HMD) de un día típico

Escenario	Nombre	Total Delay (hr)	Total Del/Veh (s)	Travel Dist (km)	Travel Time (hr)	Avg Speed (kph)
Escenario 1	Base (Situación Actual)	2517,6	772,1	11027,0	2775,8	10,0
Escenario 2	Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV	2922,7	928,7	10578,8	3169,4	9,0
Escenario 3	Gestión y Control de Tráfico GCT	3417,5	1174,8	8920,9	3626,7	6,0
Escenario 4	Restricción de Circulación Vehicular RCV (%40)	1250,8	438,5	10654,3	1501,0	16,0
Escenario 5a	Híbrido: RUEV + GCT	4427,9	1945,4	6075,4	4570,7	4,0
Escenario 5b	Híbrido: RUEV + GCT (e = -1,05)	3349,7	1508,1	6097,8	3492,3	4,0
Escenario 6	Híbrido: RUEV + RCV	1572,2	573,4	9577,4	1795,7	10,0
Escenario 7	Híbrido: RUEV + GCT + RCV	2597,4	1199,4	6280,9	2744,4	5,0

### 5.8.2.3 Indicadores ambientales

En este apartado se presentan los resultados del comportamiento de los indicadores ambientales en los 8 escenarios analizados, tanto los relacionados con emisiones contaminantes como con consumo de combustible (Monóxido de Carbono CO, Hidrocarburos no quemados HC, Óxidos de Nitrógeno NOx). Dichos resultados hacen referencia a la Hora de Mayor Demanda (HMD) de un día típico.

Las emisiones de CO representan el 88,8% de las emisiones en el promedio del total de escenarios analizados (en un rango estrecho entre 88,1% y 89,6%), seguidas de lejos por las emisiones de NOx con un 7,8% y las emisiones de HC con un 3,4%.

Las emisiones totales en el Escenario Base (Esc\_1: Situación actual) son de 225.481,0 gramos (g), de los cuales 199.335,0 corresponden a CO, 18.594 a NOx y 7.552,0 a HC.

El valor de estos indicadores de emisiones decrece en la mayoría de los escenarios futuros propuestos, como es el caso de los escenarios Esc\_3 (Gestión y Control del Tráfico, GCT), Esc\_4 (Restricción de Circulación Vehicular, REV), Esc\_5a (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico, RUEV+GCT), Esc\_6 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+RCV) y Esc\_7 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario, Gestión y Control de Tráfico y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+GCT+RCV). El valor más bajo se presenta en el escenario futuro Esc\_7 (RUEV+GCT+RCV), en el cual el total de emisiones es de 155.967,0 g., representando una drástica reducción del 30,8%

Por el contrario, el valor de estos indicadores de emisiones se incrementa ligeramente en el escenario futuro Esc\_2 (Redistribución del Uso del Espacio Viario, RUEV), en el cual el total de emisiones es de 232.399,0 g, representando un incremento del 3,1%

Figura 81. Emisiones en HMD de escenarios base y futuros (gramos)

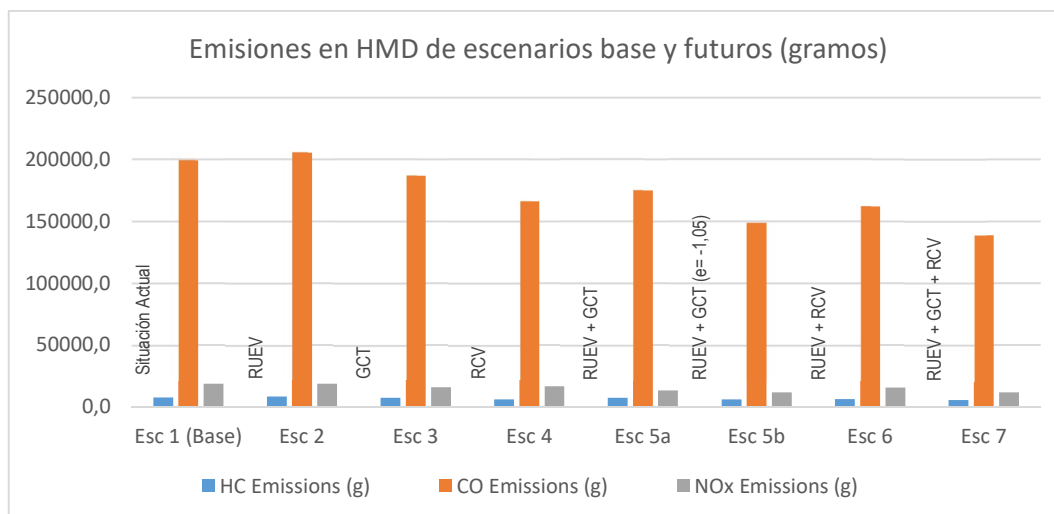


Figura 82. Emisiones de HC en HMD en escenarios base y futuros (gramos)

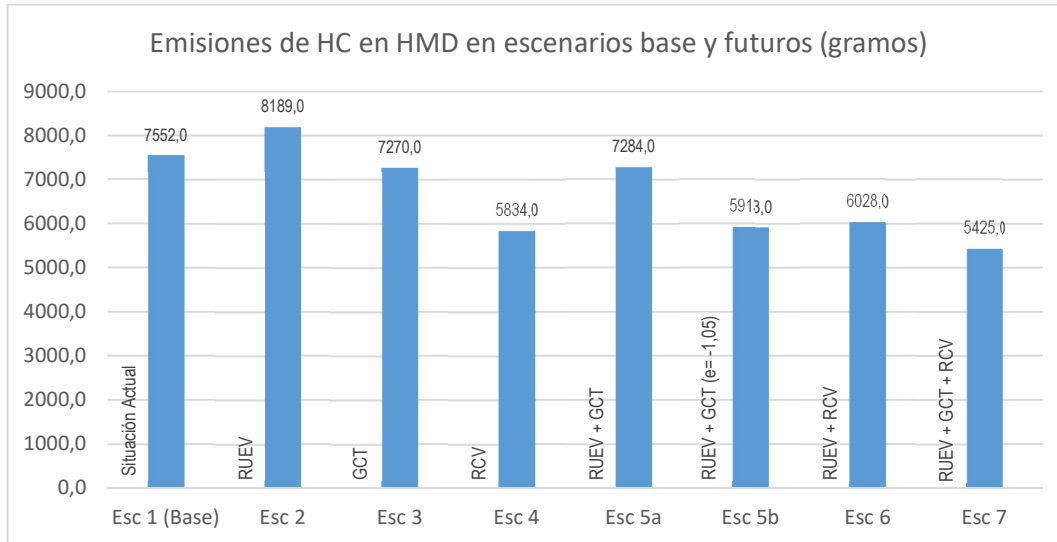


Figura 83. Emisiones de CO en HMD en escenarios base y futuros (gramos)

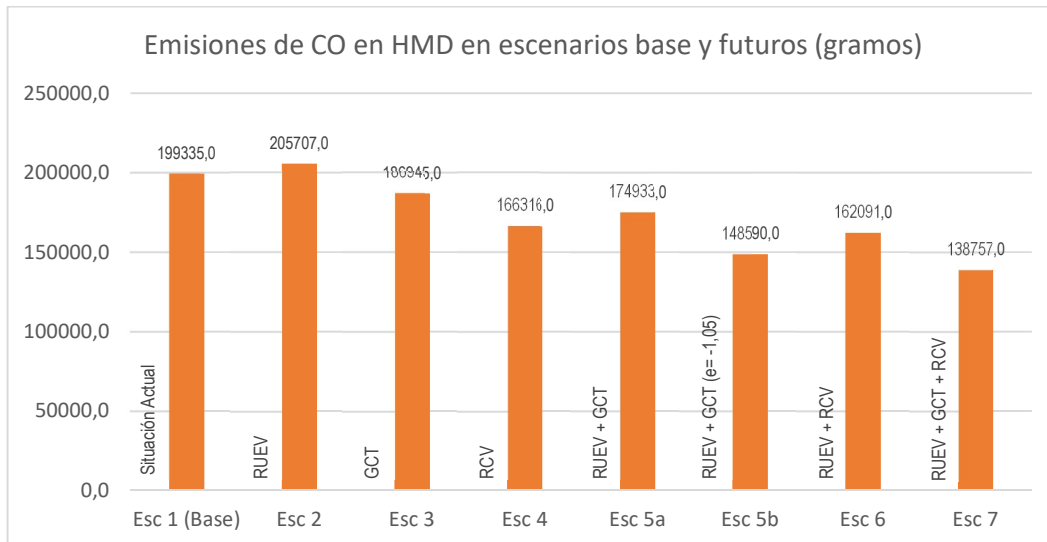


Figura 84. Emisiones de NOx en HMD en escenarios base y futuros (gramos)

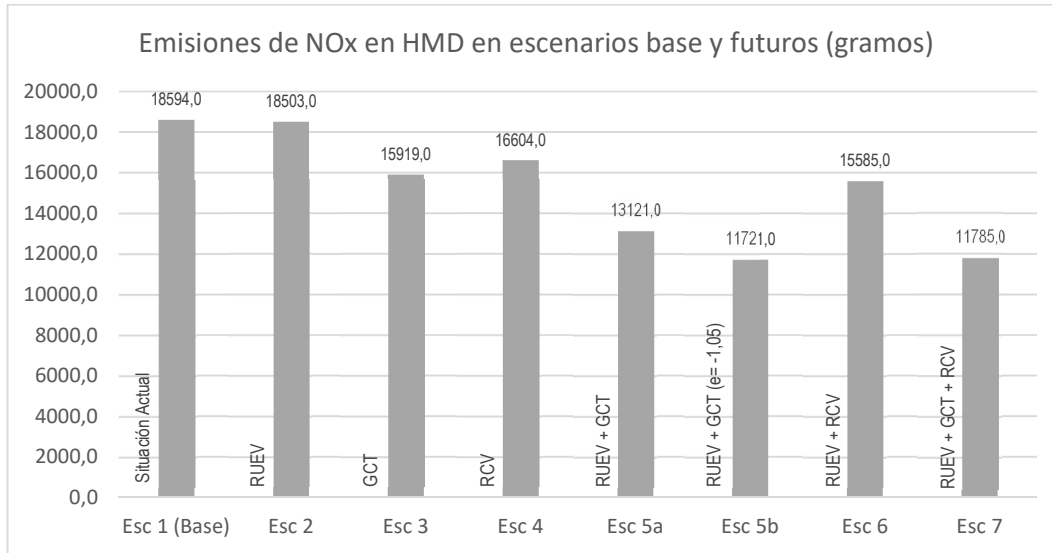
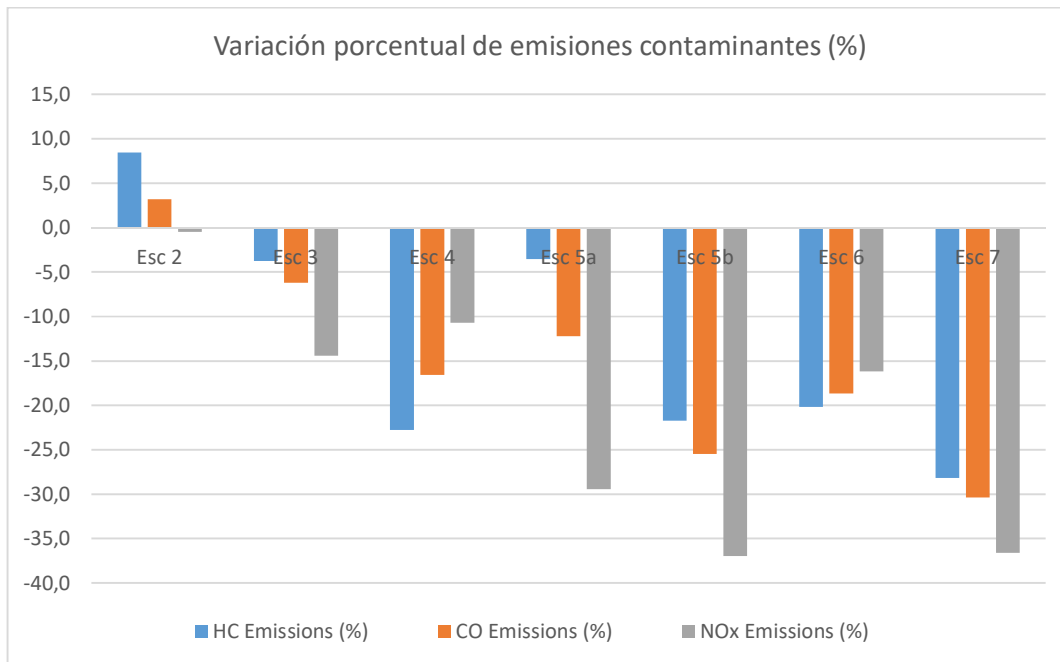


Figura 85. Variación porcentual de emisiones contaminantes (%)



El consumo total de combustible en el Escenario Base (Esc\_1: Situación actual) es de 3.097,6 litros (l).

El valor de este indicador se incrementa en los escenarios futuros propuestos Esc\_2 (Redistribución del Uso del Espacio Viario, RUEV), Esc\_3 (Gestión y Control del Tráfico, GCT) y Esc\_5a (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico, RUEV+GCT). El valor más alto es el del escenario futuro Esc\_5a (RUEV+GCT), en el cual el consumo de combustible es de 4.275,3 litros, representando un incremento del 38,0%.

Por el contrario, el valor de este indicador decrece en los escenarios futuros Esc\_4 (Restricción de la Circulación Vehicular, RCV), Esc\_6 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+RCV) y Esc\_7 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario, Gestión y Control de Tráfico y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+GCT+RCV). El valor más bajo es el del escenario futuro Esc\_4 (Restricción de la Circulación Vehicular, RCV), en el cual el consumo de combustible es de 1.999,0 litros, representando una reducción del 35,5%.

En lo que respecta a la eficiencia del uso del combustible, el Escenario Base (Esc\_1: Situación actual) presenta una eficiencia de 3,6 kilómetros por litro (k/l). El valor de este indicador decrece en la mayoría de los escenarios futuros, como es el caso de Esc\_2 (RUEV), Esc\_3 (GCT), Esc\_5a (RUEV+GCT) y Esc\_7 (RUEV+GCT+RCV) presentándose el menor valor en el escenario Esc\_5a con 1,4 k/l, lo cual representa una reducción de la eficiencia del 61,1%. Por el contrario, la eficiencia se incrementa en los escenarios Esc\_4 (RCV) y Esc\_6 (RUEV+RCV), presentándose el mayor valor en el escenario Esc\_4 con 5,3 km/l, lo cual representa un incremento de la eficiencia del 47,2%.

Figura 86. Consumo de combustible en HMD en escenarios base y futuros (litros)

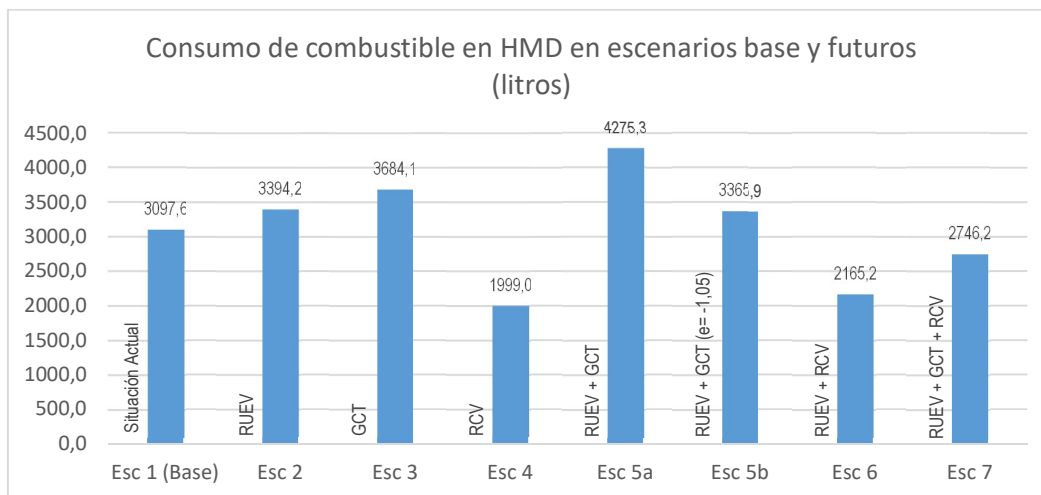


Figura 87. Variación porcentual de consumo de combustible en HMD en escenarios futuros (%)

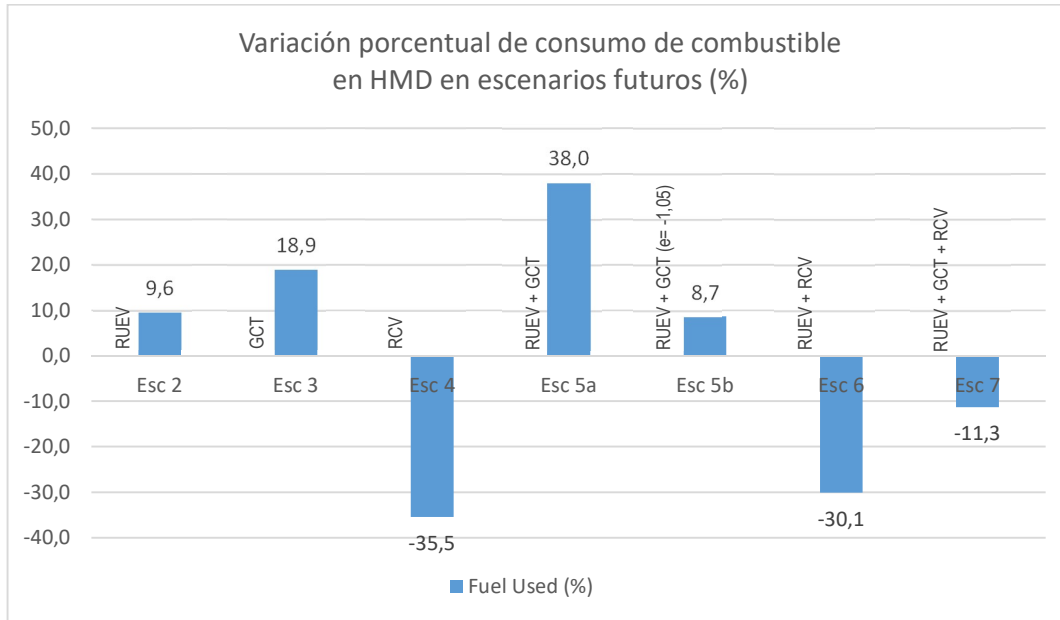


Figura 88. Eficiencia de combustible en HMD en escenarios base y futuros (Kilómetros por litro)

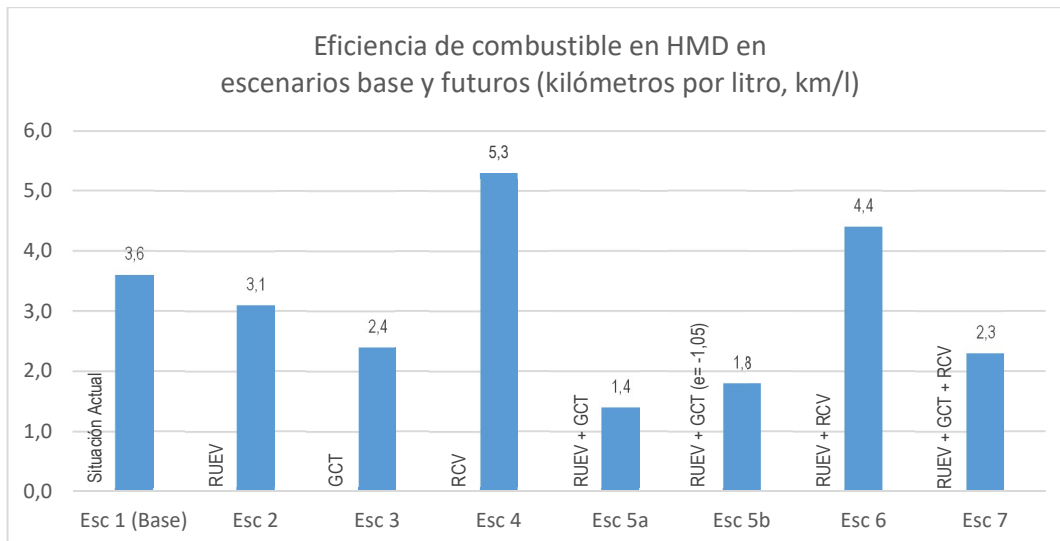


Tabla 22. Indicadores ambientales en Hora de Mayor Demanda (HMD) en un día típico

Escenario	Nombre	HC Emissions (g)	CO Emissions (g)	NOx Emissions (g)	Fuel Used (l)	Fuel Eff, (kpl)
Escenario 1	Base Situación Actual (con RCV 20%)	7552,0	199335,0	18594,0	3097,6	3,6
Escenario 2	Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV	8189,0	205707,0	18503,0	3394,2	3,1
Escenario 3	Gestión y Control de Tráfico GCT	7270,0	186945,0	15919,0	3684,1	2,4
Escenario 4	Restricción de Circulación Vehicular RCV (40%)	5834,0	166316,0	16604,0	1999,0	5,3
Escenario 5a	Híbrido: RUEV + GCT	7284,0	174933,0	13121,0	4275,3	1,4
Escenario 5b	Híbrido: RUEV + GCT (e = -1,05)	5913,0	148590,0	11721,0	3365,9	1,8
Escenario 6	Híbrido: RUEV + RCV	6028,0	162091,0	15585,0	2165,2	4,4
Escenario 7	Híbrido: RUEV + GCT + RCV	5425,0	138757,0	11785,0	2746,2	2,3



#### 5.8.2.4 Indicadores económicos

En este apartado se presentan los resultados del comportamiento de los indicadores económicos en los 8 escenarios analizados, en particular el costo económico por congestión. Dichos resultados hacen referencia a la Hora de Mayor Demanda (HMD) de un día típico.

El costo económico por congestión (o pérdida económica por congestión) en el Escenario Base (Esc\_1: Situación actual) es de 60,91 Millones de Pesos Colombianos (COP).

El valor de este indicador se incrementa en la mayoría de los escenarios futuros propuestos, como es el caso de Esc\_2 (Redistribución del Uso del Espacio Viario, RUEV), Esc\_3 (Gestión y Control del Tráfico, GCT), Esc\_5a (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico, RUEV+GCT) y Esc\_7 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario, Gestión y Control de Tráfico y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+GCT+RCV). El valor más alto es el del escenario futuro Esc\_5a (RUEV+GCT), en el cual el costo económico por congestión es de 107,13 Millones COP, representando un incremento del 75,8%.

Por el contrario, el valor de este indicador decrece en los escenarios futuros Esc\_4 (Restricción de la Circulación Vehicular, RCV) y Esc\_6 (esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Restricción de Circulación Vehicular, RUEV+RCV). El valor más bajo es el del escenario futuro Esc\_4 (RCV), en el cual el costo económico por congestión es de 30,26 Millones COP, representando una reducción del 50,3%.

Figura 89. Costo económico por congestión en Hora de Mayor Demanda HMD en escenarios base y futuros (Millones COP)

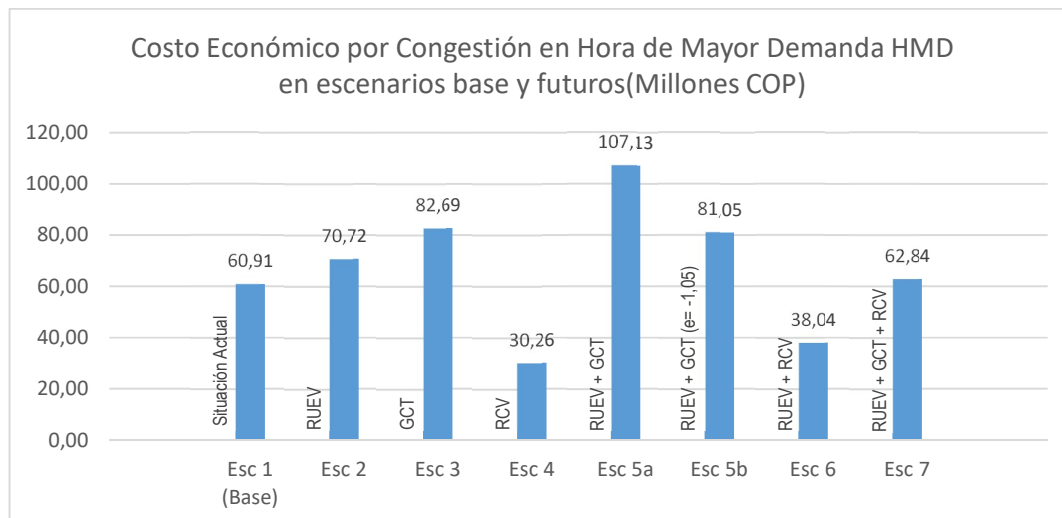


Figura 90. Variación del costo económico por congestión en HMD en escenarios futuros (%)

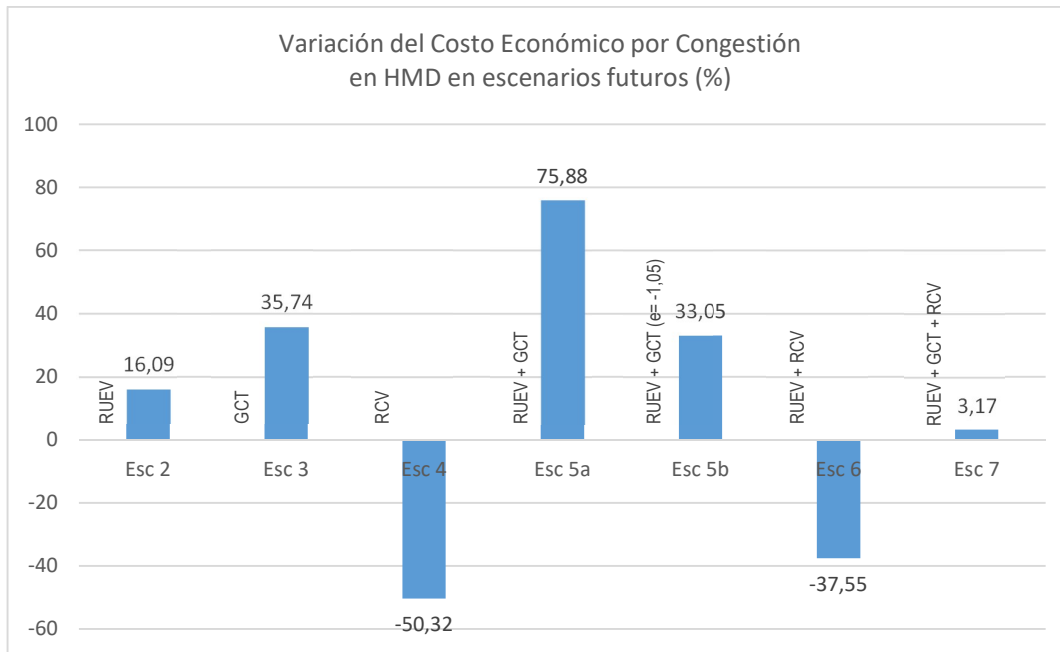


Tabla 23. Costo económico por congestión en HMD (Millones COP)

Escenarios	Nombre	Hora Máxima Demanda
Esc 1 (Base)	Base (Situación Actual)	60,91
Esc 2	Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV	70,72
Esc 3	Gestión y Control de Tráfico GCT	82,69
Esc 4	Restricción de Circulación Vehicular RCV	30,26
Esc 5a	Híbrido: RUEV + GCT	107,13
Esc 5b	Híbrido: RUEV + GCT (e = -1,05)	81,05
Esc 6	Híbrido: RUEV + RCV	38,04
Esc 7	Híbrido: RUEV + GCT + RCV	62,84

### **5.8.3 Selección del esquema**

Para seleccionar el esquema que mejor cumple el objetivo de internalizar las externalidades de congestión generadas por el transporte privado, se contrasta la Penalización Resultante (demora adicional resultante) de cada una de las 6 medidas planteadas con la Penalización Objetivo (demora adicional objetivo), la cual fue preestablecida en 806,4 segundos en apartados anteriores.

Para el esquema de Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV), la penalización resultante es de 156,6 segundos, mientras la penalización objetivo era de 806,4 segundos, con lo cual solo se logra un 19,4% de la penalización objetivo. Dado que el porcentaje que se logra de la penalización objetivo es bajo, se puede optar por volver a la etapa de formulación del RUEV para ajustar el listado de proyectos (ya sea adicionando proyectos o proponiendo intervenciones de los existentes con transformaciones más profundas) o se puede complementar con otros instrumentos para conformar esquemas híbridos con el fin de lograr la penalización objetivo. En tanto que en esta aplicación práctica ya se han incorporado todos los proyectos RUEV disponibles en el Plan Integral de Movilidad Urbana (PIMU), se toma la decisión de complementar con otros instrumentos mediante esquemas híbridos.

Para el esquema de Gestión y Control de Tráfico (GCT), la penalización resultante es de 402,7 segundos, con lo cual se logra un 49,9% de la penalización objetivo. En tanto que en esta aplicación práctica ya se incorporó el alcance del PIMU, el cual es que todas las intersecciones cuenten con regulación semafórica e incorporen la fase verde para el peatón, se plantea la necesidad de complementar con otros instrumentos para conformar esquemas híbridos que logren un mayor porcentaje de la penalización objetivo.

Para el esquema de Restricción de Circulación Vehicular (RCV) y el esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Restricción de Circulación Vehicular (RUEV+RCV), las penalizaciones resultantes son negativas, lo cual indica que deben ser descartadas dado que no generan demoras adicionales, esto dado que la lógica del instrumento RCV es reducir de manera significativa e instantánea el número de vehículos circulando en la red.

Para el esquema híbrido Redistribución del Uso del Espacio Viario, Gestión y Control del Tráfico y Restricción de Circulación Vehicular (RUEV+GCT+RCV), la penalización resultante es de 427,3 segundos, con lo cual se logra un 53,0% de la penalización objetivo.

Para el esquema híbrido Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV+GCT), la penalización resultante es de 1173,3 segundos, con lo cual se logra un 145,5% de la penalización objetivo.

Dado que el esquema híbrido RUEV+GCT es el que logra igualar o superar la penalización objetivo en el corto plazo, se procede a estimar cuál sería su penalización

resultante en el mediano plazo considerando el efecto de ajuste (reducción) de la demanda a consecuencia de la implementación de la medida (para lo cual se usa una elasticidad de -1,05). Así, se puede ver que la penalización resultante en el mediano plazo sería de 736,0 segundos, logrando un 91,3% de la penalización objetivo.

Con base en lo anterior, se selecciona el esquema híbrido Redistribución del Uso del Espacio Vario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV+GCT) y su correspondiente escenario E\_5b, como el que mejor cumple el objetivo de internalizar las externalidades de congestión generadas por el transporte privado.

Tabla 24. Penalización objetivo versus penalización resultante de cada uno de los esquemas

Esquemas propuestos	Penalización Objetivo PO	Penalización Resultante PR en el corto plazo	Porcentaje de penalización en el corto plazo	Penalización Resultante PR en el mediano plazo e=-1,05	Porcentaje de penalización en el mediano plazo
	(segundos)	(segundos)	(%)	(segundos)	(%)
RUEV Redistribución del Uso del Espacio Viario	806,4	156,6	19,4	-	-
GCT Gestión y Control de Tráfico	806,4	402,7	49,9	-	-
RCV Restricción de Circulación Vehicular	806,4	-333,6	-41,4	-	-
Híbrido: RUEV + GCT	<b>806,4</b>	1173,3	145,5	<b>736,0</b>	91,3
Híbrido: RUEV + RCV	806,4	-198,7	-24,6	-	-
Híbrido: RUEV + GCT + RCV	806,4	427,3	53,0	-	-

#### **5.8.4 Evaluación**

En este apartado se realiza un comparativo del resultado de los indicadores en el escenario base (Esc\_1: Situación actual) y el escenario futuro deseable, con el fin de determinar los beneficios sociales asociados. Para dicha evaluación se usa como escenario futuro deseable el Esc\_5b, el cual está basado en el esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV+GCT) pero además incluye su horizonte temporal de mediano plazo, en el cual se contempla el ajuste (reducción) de la demanda derivada de su implementación. Los valores aquí presentados corresponden a la Hora de Mayor Demanda (HMD) en un día típico.

Se debe recordar que en este documento se asume que, en el contexto de la teoría de la tarifa óptima, el recaudo del cargo aplicado al vehículo particular es transferido indirectamente a la sociedad en forma de inversiones para la mejora del servicio de transporte público y otros modos de movilidad sostenible, de esta manera el bienestar social maximizado consiste de dos componentes, uno experimentado por los usuarios que se mantienen y otro que se transfiere como recaudo del cargo aplicado.

De la misma manera, con respecto al esquema de control propuesto, el recaudo en tiempo de viaje proveniente del vehículo particular debe ser entendido como una consecuencia directa de la mejora de los modos alternativos de transporte sostenible (transporte público y no motorizados). Y, dado que esto contribuye a generar un escenario que fomenta el cambio modal hacia modos de transporte sostenible reduciendo las externalidades negativas, puede ser considerado como un componente del bienestar social maximizado. Así, para la maximización del bienestar social se contabilizan las externalidades negativas en las que se deja de incurrir en el escenario deseable gracias a la implementación del esquema híbrido RUEV+GCT.

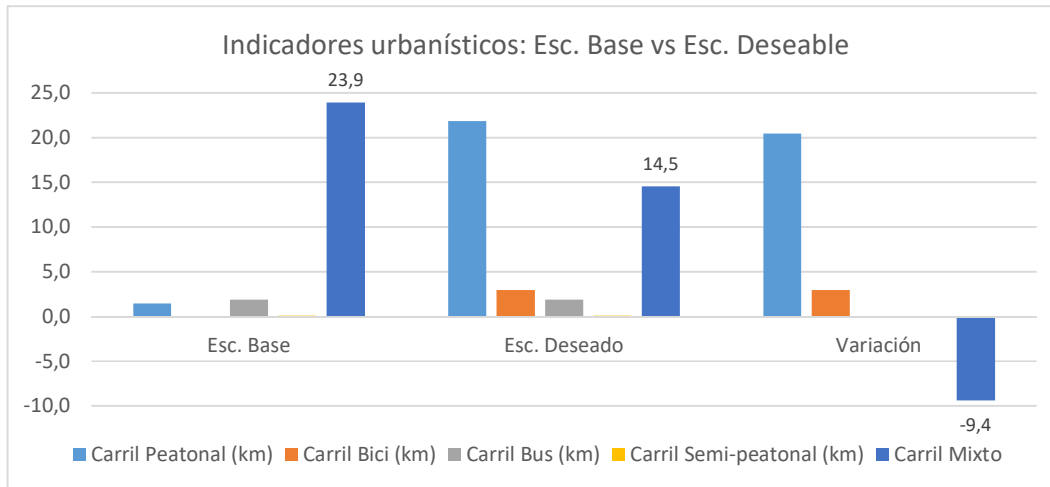
Por tanto, en el contexto de esta aplicación práctica, los beneficios sociales surgen, principalmente, de los componentes urbanístico y ambiental, entendidos en términos de una redistribución más eficiente y equitativa del espacio viario urbano y la reducción en emisiones contaminantes.

En el componente urbanístico, el escenario deseable Esc\_5b genera un beneficio social en términos de la reducción del espacio viario (de la calzada vehicular) destinado al transporte privado y transferido a los modos de transporte más sostenible. De los 23,9 km de carril mixto destinados al transporte particular en el escenario base, se pasa a 14,5 km en el escenario deseable, una reducción del 39,2%. La mayor transferencia de espacio viario (de la calzada vehicular) se hace hacia el carril peatonal, el cual pasa de 1,4 km en el escenario base a 21,9 km en el escenario deseable, un incremento de 1.420,8%.

De esta manera, se pasa de un escenario base con una distribución del uso del espacio viario orientado al transporte privado (donde la mayor participación la tiene el carril mixto para el transporte privado con un 87,4% y el restante 12,6% la tienen

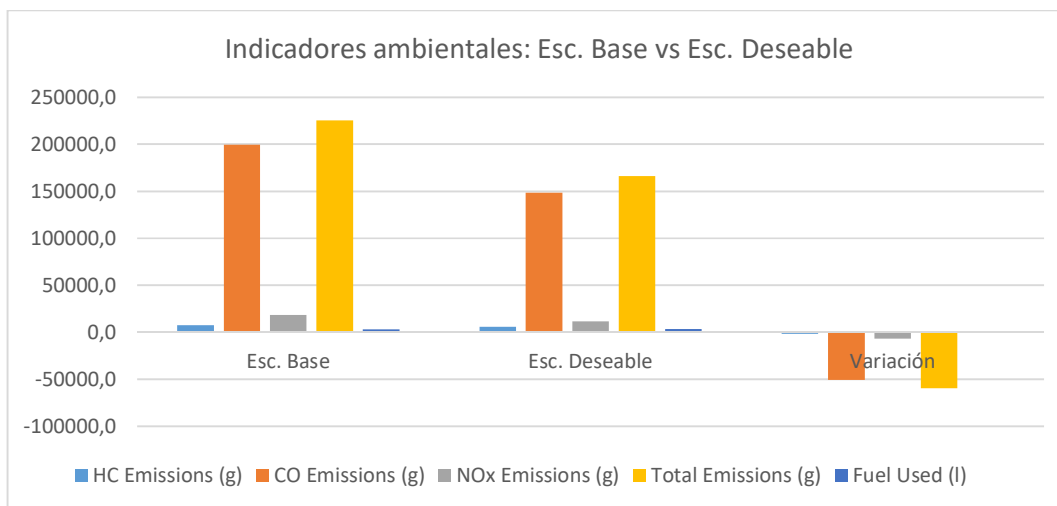
los carriles para los modos de transporte sostenible) a un escenario futuro deseable con una distribución orientada a los modos más sostenibles (donde el carril mixto para transporte privado pasa a tener un 35,1% y los modos de transporte sostenible tienen la mayor con un 64,9%).

Figura 91. Indicadores urbanísticos: Escenario Base vs Escenario Deseable



En el componente ambiental, el escenario deseable Esc\_5b genera un beneficio social en términos de reducción de emisiones contaminantes. De los 225.481,0 gramos (0,22 toneladas) de emisiones contaminantes de HC, CO y NOx en la Hora de Mayor Demanda HMD del escenario base, se pasa a 166.224,0 gramos (0,16 toneladas) en el escenario deseable, una reducción del 26,3%.

Figura 92. Indicadores ambientales: Escenario Base vs Escenario Deseable



Los costos sociales tienen su base en los costos económicos por congestión (o pérdidas económicas por congestión) los cuales en el escenario base son de 60,9 Millones de Pesos Colombianos (COP) y en el escenario deseable pasan a ser de 81,0 Millones COP, con un incremento del 33,1%.

Desde una perspectiva global de beneficios y costos sociales, los resultados de la aplicación práctica para el caso del Centro Histórico de Santiago de Cali sugieren que los beneficios sociales del escenario deseable con respecto al escenario base, derivados de una reasignación más eficiente en la red y una reducción de la demanda de viajes en vehículo particular, incluyen un incremento de 52,3 puntos porcentuales en la participación de los modos de transporte sostenible en la distribución del uso del espacio viario y una reducción del 26,3% en las emisiones contaminantes.

Si bien, dichos beneficios sociales guardan relación con un incremento del 33,1% en los costos económicos (pérdidas económicas) por congestión del escenario deseable con respecto al escenario base, se debe tener en consideración que en el presente documento se usó una elasticidad bastante prudente (relativamente baja). Con lo cual, dicho incremento de los costos económicos por congestión podría ser menor en el caso de constatarse que la realidad local presenta mayores elasticidades.

En cualquier caso, estos dichos costos económicos por congestión son superados por los beneficios sociales. Aún más si se consideran en el análisis otros beneficios sociales como la reducción de la siniestralidad vial (lesionados y fallecidos) y la contaminación acústica, al igual que las mejoras en accesibilidad universal, entre otros aspectos sociales, no obstante, estos no fueron incluidos en el presente estudio.

## 6 CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

### 6.1 Conclusiones

El concepto del espacio viario urbano como un bien público y un recurso escaso que debe ser usado de manera eficiente ha tomado fuerza en los lineamientos de política pública y la práctica de planificación en el campo de la movilidad sostenible en diversos contextos a nivel mundial.

Si bien, algunos instrumentos de gestión de la movilidad como la “Redistribución del Uso del Espacio Viario”, entre otros, han sido desarrollados para promover una redistribución más eficiente y equitativa del uso del espacio viario urbano, que le otorgue prioridad a los modos de transporte sostenible (peatón, bicicleta y transporte público) en detrimento del vehículo particular, la decisión sobre cuánto espacio viario debe ser transferido ha estado enmarcada más en el terreno de lo político que de lo técnico. No se ha contado con una formulación teórica y metodológica para el cálculo de la cantidad de espacio a transferir, que le de soporte científico a tales decisiones.

El presente documento desarrolla las bases conceptuales y metodológicas de un instrumento alternativo de gestión de la movilidad denominado “Retribución de Espacio Viario según Costes Sociales de Congestión” (en inglés, *Road Space Retribution Charge by Congestion Costs, SRC*), el cual ha sido desarrollado bajo un enfoque de microeconomía aplicada, tomando como referente la teoría clásica de la tarifa óptima por congestión.

El propuesto instrumento SRC permite calcular el porcentaje de espacio viario urbano destinado al vehículo privado que debe ser transferido a otros modos de transporte de mayor eficiencia (transporte público y modos no motorizados) en función de la internalización de los costes sociales de congestión del vehículo privado.

Los resultados del desarrollo analítico de las bases conceptuales y metodológicas del SCR, mediante el ejemplo del caso simple de dos rutas, sugieren que el inicial incremento de tiempo de viaje que experimenta el vehículo particular a consecuencia de la reducción de su espacio viario puede favorecer una mejora de la movilidad, dado que se puede generar una reasignación más eficiente del tráfico del vehículo particular en la red y un cambio modal hacia el transporte público (y los modos no motorizados), el cual puede experimentar una mejora en su tiempo de viaje, entre otros atributos, al contar con un carril exclusivo. De igual manera, el SCR puede lograr un mejor bienestar social con respecto a un escenario no controlado de equilibrio del usuario, y puede tener, bajo ciertas circunstancias, similares resultados a los de la tarificación viaria en lo que respecta al desincentivo de la demanda en vehículo particular.



Si bien, la mejora del bienestar social logrado con la implementación del instrumento SCR, en comparación con el ineficiente estado de equilibrio del usuario, es fácilmente probado, la equivalencia de la condición de optimalidad entre los dos instrumentos de regulación analizados aquí (la tradicional teoría de la tarificación marginal y la propuesta estrategia de control de la oferta) puede generar un interesante debate.

Por lo cual, es necesario clarificar algunos aspectos clave con respecto a este tema, como se resume a continuación:

- Por una parte, es necesario entender que no se trata estrictamente de una conversión directa de una tarifa monetaria óptima (usando un valor subjetivo del tiempo) a una demora adicional en el tiempo de viaje (por medio de una reducción del espacio viario) sino de una aproximación de la reducción de la oferta viaria al vehículo particular a partir de una tasa óptima por congestión con el fin de internalizar sus externalidades. Este aspecto es abordado aquí a partir de establecer una relativa equivalencia entre la tarifa óptima y la penalización en tiempo de viaje al vehículo particular, y no a partir de una igualdad en el sentido estricto del término, ello dado el carácter discreto (no continuo) de la oferta de espacio viario. Así, la equivalencia entre los dos instrumentos puede ser considerada válida dada su diferente naturaleza: uno monetario y otro espacial.
- Por otra parte, en este documento se asume que, en el contexto de la teoría de la tarifa óptima, el recaudo del cargo aplicado al vehículo particular es transferido indirectamente a la sociedad en forma de inversiones para la mejora del servicio de transporte público y otros modos de movilidad sostenible, de esta manera el bienestar social maximizado consiste de dos componentes, uno experimentado por los usuarios que se mantienen y otro que se transfiere como recaudo del cargo aplicado.
- De la misma manera, con respecto al esquema de control propuesto, el recaudo en tiempo de viaje proveniente del vehículo particular debe ser entendido como una consecuencia directa de la mejora de los modos alternativos de transporte sostenible (transporte público y no motorizados). Y, dado que esto contribuye a generar un escenario que fomenta el cambio modal hacia modos de transporte sostenible reduciendo las externalidades negativas, puede ser considerado como un componente del bienestar social maximizado.

Se presentan tres alternativas para la implementación práctica del SRC: (i) "SRC en un corredor urbano congestionado", (ii) "SRC en centro urbano", (iii) "SRC y road pricing en centro urbano":

- SRC en un corredor urbano congestionado

Esta primera alternativa trata la aplicación del SRC en un corredor urbano con presencia de congestión y el cual ha sido identificado como una arteria de carácter estratégico para la movilidad de la ciudad.

Este tipo de aplicación requiere la existencia de un mínimo de 4 carriles por sentido en la arteria a intervenir. De otra manera, dado el carácter discreto que se le da aquí a la capacidad viaria (número de carriles), se produciría una exagerada sobre-penalización, lo cual distorsionaría la aplicación del modelo.

El objetivo de este tipo de implementación no es una eliminación total o una reducción substancial de la congestión en los carriles destinados al vehículo privado. Por el contrario, el éxito de la implementación radica en el hecho de que los conductores que usan el corredor experimenten cierto nivel de congestión adicional, el cual, frente a una mejora substancial de los tiempos de viaje en transporte público al contar con carriles exclusivos, potencie un cambio modal del vehículo particular hacia el transporte público.

Este primer caso de aplicación es susceptible de utilizar el “first best” (o tarificación en función de costes marginales) como sistema de fijación de precios, al tratarse de un único arco como objeto de estudio, con lo cual se busca que los usuarios del vehículo privado asuman el total de sus costes marginales sociales.

Cabe anotar que para el caso de redes más complejas ha de trabajarse con el “second best” como sistema de fijación de precios, para evitar inequidades en la tasación de los diversos arcos de la red.

- SRC en centro urbano

Una segunda alternativa de aplicación práctica trata la implementación del SRC en una zona de regulación, en particular, el centro de la ciudad, dado que éste concentra los mayores niveles de congestión. En ámbitos como este el dar prioridad al transporte público y los modos no motorizados es una tarea de gran interés para diversas administraciones locales.

En este caso, a partir de un cordón que delimita la zona de regulación de la ciudad, se calcula su la externalidad por congestión generada por el vehículo particular. Posteriormente, dicha externalidad es cargada a los usuarios del vehículo privado mediante la aplicación del SRC en diversos corredores de la zona, previamente identificados como estratégicos, en función de las necesidades que cada uno de los corredores seleccionados plantee.

De esta manera, mientras en los corredores que albergan una mayor actividad comercial una ampliación de aceras para peatones resulta más conveniente, en otros corredores lo idóneo es crear prioridad para el

transporte público (carril bus), o en itinerarios especiales proveer un carril-bici.

Así, el SRC podría ser expresado en metros o kilómetros lineales de carril exclusivo para cada uno de los modos de transporte, el cual puede ser materializado con diversas actuaciones en los arcos comprendidos en el área de estudio.

Una versión más compleja de esta segunda alternativa de aplicación puede involucrar adicionar diversas medidas de gestión de la movilidad relacionadas con regulación del tráfico (implementación de intersecciones con regulación semafórica o ajuste de las existentes para dar prioridad a peatones y ciclistas) y/o restricciones de circulación vehicular (a un porcentaje de los vehículos y en un periodo de tiempo establecido), de manera que dicho esquema híbrido espacio-regulatorio logre que el conductor internalice su externalidad por congestión.

- SRC y road pricing en centro urbano

Una tercera alternativa de aplicación tiene que ver con la posibilidad de realizar una aplicación híbrida espacio-monetaria en la cual la externalidad calculada para la zona de regulación (centro de la ciudad), sea cargada al usuario del vehículo privado, una parte en forma de cargo monetario (con road pricing electrónico) en los puntos de acceso de la misma, y otra parte en forma de cargo espacial (con SRC) sobre uno o varios corredores urbanos estratégicos en los cuales se evidencie la necesidad de rediseñar su sección viaria para dar prioridad al transporte público y los modos no motorizados.

Para este caso en concreto resultaría conveniente involucrar varias externalidades además de la congestión. Así, es posible abordar el tema ya no solo desde el concepto de la capacidad funcional de la vía sino desde la capacidad ambiental. Esta metodología redundaría en una tasa general más robusta, que resulte suficiente para: (i) desincentivar a una porción de usuarios de usar el vehículo privado para acceder a la ciudad gracias a la aplicación del peaje monetario en los accesos y (ii) generar una más eficiente redistribución del tráfico de vehículo privado al interior de la ciudad y promover un cambio en la elección modal del vehículo particular hacia el transporte público gracias a la aplicación del cargo espacial sobre el corredor urbano identificado como estratégico.

Desde una perspectiva más amplia, las tres alternativas para la aplicación práctica del SRC planteadas aquí son esquemas básicos que pueden ser adaptados para ser implementados en diversas ciudades las cuales tengan un gran interés en afrontar el aspecto que aquí consideramos clave en la movilidad sostenible: una distribución modal más racional y eficiente uso del espacio viario urbano.

Se desarrolla una aplicación práctica para Santiago de Cali (Colombia), con base en la segunda alternativa de implementación práctica denominada “SRC en centro urbano”.

Para ello, con base en el SCR, se formula una propuesta de Redistribución del Uso del Espacio Viario RUEV para el Centro Histórico, y se evalúa el potencial impacto que esta, de manera aislada o como parte de una estrategia híbrida, puede tener como gestor eficiente de movilidad.

El esquema híbrido de Redistribución del Uso del Espacio Viario y Gestión y Control del Tráfico (RUEV+GCT) es seleccionado como el más adecuado para la internalización de externalidades por congestión.

Los resultados de la aplicación práctica sugieren que los beneficios sociales del escenario deseable con respecto al escenario base, derivados de una reasignación más eficiente en la red y una reducción de la demanda de viajes en vehículo particular, incluyen un incremento de 52,3 puntos porcentuales en la participación de los modos de transporte sostenible en la distribución del uso del espacio viario y una reducción del 26,3% en las emisiones contaminantes. Si bien, dichos beneficios sociales guardan relación con un incremento del 33,1% en los costos económicos (pérdidas económicas) por congestión del escenario deseable con respecto al escenario base, se debe tener en consideración que en el presente documento se usó una elasticidad bastante prudente (relativamente baja). Con lo cual, dicho incremento de los costos económicos por congestión podría ser menor en el caso de constatar que la realidad local presenta mayores elasticidades.

En cualquier caso, dichos costos económicos por congestión son superados por los beneficios sociales. Aún más si se consideran en el análisis otros beneficios sociales como la reducción de la siniestralidad vial (lesionados y fallecidos) y la contaminación acústica, al igual que las mejoras en accesibilidad universal, entre otros aspectos sociales, no obstante, estos no fueron incluidos en el presente estudio.

Desde una perspectiva más amplia de política pública de movilidad sostenible en el Municipio de Santiago de Cali, los resultados de esta investigación sugieren que el paquete de proyectos de Redistribución del Uso del Espacio Viario (RUEV) para el Centro Histórico planteadas en el Plan Integral de Movilidad Urbana PIMU Visión 2030 (adoptado en 2019) contribuyen de manera significativa en el objetivo de una internalización de las externalidades generadas por el transporte privado. Sin embargo, dado que estas solo logran una internalización parcial, cercana al 58%, se hace necesario que sean implementadas en el marco de una estrategia híbrida que involucre tanto Redistribución del Uso del Espacio Viario como medidas de Gestión y Control del Tráfico (RUEV+GCT) de manera que en conjunto puedan lograr una internalización completa de las externalidades.

Finalmente, se sugiere que el instrumento SCR podría tener una mayor aceptación por parte de los ciudadanos y la administración local que instrumentos tradicionales de tarificación viaria. Primero, al no tratarse de un pago monetario directo por parte

de los usuarios. Segundo, dada su doble función como instrumento de sostenibilidad en transporte urbano: óptima distribución modal del uso del espacio viario urbano y promoción de un cambio modal hacia el transporte público como alternativa de mayor eficiencia ambiental. Y, tercero, dado que su materialización es aprovechada para llevar a cabo actuaciones urbanísticas de mejora del espacio público. No obstante, la demostración de dicha potencial mayor aceptación social no es abordada en el presente documento y deberá ser objeto de futuras investigaciones para el contexto local.

## **6.2 Investigación futura**

El presente documento pretende ser un primer paso hacia futuras investigaciones sobre las posibles equivalencias entre instrumentos de gestión de la movilidad de diferentes naturalezas (económicos y espaciales), lo cual implica no solo una evaluación económico-monetaria estándar sino una evaluación multi-objetivo de dichas medidas.

En este sentido, se requiere el desarrollo de aplicaciones de economía del transporte que estén más cercanas a las necesidades y realidades de los entornos urbanos. De manera específica, la extensión futura de la presente investigación requiere adentrarse en una mayor sofisticación de la modelación para redes complejas para la evaluación de diversos tipos de medidas híbridas no solo espaciales, sino también en combinación con medidas regulatorias y penalizaciones monetarias.

De igual manera, se requiere indagar en la potencial mayor disposición o mayor aceptación por parte de ciudadanos y administraciones locales en lo que respecta a la implementación de medidas de penalización espacial con respecto a las tradicionales medidas de penalización monetaria.

La investigación futura debería enlazar la metodología aquí desarrollada con el Diagrama Fundamental Macroscópico (*Macroscopic Fundamental Diagram, MFD*), relación entre flujo y densidad vehicular a nivel de zona, podría incluir otros efectos positivos ambientales y sociales, mejoras en el modelo de simulación y una sistematización para la generación de “paquetes” de secciones de calles y su continuidad a nivel de zona/barrio.

## Referencias

- Allport, R. J. (1981). The costing of bus, light rail transit and metro public transport systems. *Traffic Engineering and Control*, 22, 633-639.
- Arnott, A., De Palma, A., & Lindsey, R. (1990a). Departure time and route choice for the morning commute. *Transportation Research Part B*, 24(3), 209-228.
- Arnott, R., De Palma, A., & Lindsey, R. (1990b). Economics of a bottleneck. *Journal of Urban Economics*, 27(1), 111-130.
- Arnott, R., De Palma, A., & Lindsey, R. (1993). A structural model of peak-period congestion: A traffic bottleneck with elastic demand. *The American Economic Review*, 83(1), 161-179.
- Atkins, S. and Cairns, S. (2002) *Reallocating Roadspace: An Update of Case Study Evidence and Related Research*. ESRC TSU working paper, Transport Studies, UCL, London, 2002.
- Bonsall, P. W. and Palmer, I. A. (1997). Do time-based road-user charges induce risk-taking? – Results from a driving simulator. *Traffic Engineering and Control* 38 (4).
- Borjesson, M., Eliasson, J., Hugosson, M.B., Brundell-Freij, K., 2012. The Stockholm congestion charges-5 years on. Effects, acceptability and lessons learnt. *Transport Policy*, 20, 1–12.
- Branston, D. (1976). Arco capacity functions: A review. *Transportation Research* 10, pp 223-236
- BPR Bureau of Public Roads (1964) *Traffic Assignment Manual*. U.S. Department of Commerce, Office of Planning, Urban Planning Division. Washington D.C.
- Breithaupt, M. and Fjellstrom, K. (2002) *Transport demand management: towards an integrated approach*. Paper presented at the Regional Workshop on Transport Planning, Demand Management and Air Quality, Manila, Philippines, 26–27 February 2002.
- Bus Rapid Transit Policy Center. Web-site: [www.gobrt.org](http://www.gobrt.org)
- Bull, A. (2003) *Congestión de Tránsito: El Problema y Cómo Enfrentarlo*. Prepared for Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) and Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit
- Button, K.J., (1991) *Electronic road pricing: experience and prospects*. In: *Proceedings of the Economy and Environment in the 1990s*, University of Neuchatel.
- Cain, A. (2005). "Achieving majority public support for urban road pricing. Preserving the driver's right to choose." *Transportation Research Record*, 1932, Transportation Research Board of National Academies, Washington, D.C., 119-128.

- Cairns, S; Atkins, S; and Goodwin, P. (2001), Disappearing Traffic: The Story So Far. Centre for Transport Studies, University College London ([www.ucl.ac.uk/transport-studies/tsu/disapp.pdf](http://www.ucl.ac.uk/transport-studies/tsu/disapp.pdf)).
- Cairns, S., Atkins, S., and Goodwin, P. (2002). "Disappearing traffic? The story so far." Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal Engineer., 151(1), 13-22, Telford, London, UK.
- Cairns, S., Hass-Klau, C., & Goodwin, P. (1998) Traffic impact of highway capacity reductions; assessment of the evidence. Landor Publishing, London, 1998. (With an annex by Ryuichi Kitamura, Toshiyuki Yamamoto and Satoshi Fujii).
- Cairns, S; SLOMAN, L; Newson, C; Anable, J; Kirkbride, A; and Goodwin, P (2004) Smarter Choices - Changing the Way We Travel. Final report. UK Department for Transport ([www.dft.gov.uk](http://www.dft.gov.uk)).
- Cairns, S. and Goodwin, P. B. (2002) Traffic Impact of Highway Capacity Reductions: What Transport Professionals Think. ESRC TSU working paper, Transport Studies, UCL, London, 2002.
- Cano T, Maria I. (2004) Guía sobre la implantación de una tasa por congestión en Barcelona. Tesina. ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.
- Cantillo-García, V; Guzmán, L.A; Arellana, J. (2019). Socioeconomic strata as proxy variable for household income in transportation research. Evaluation for Bogotá, Medellín, Cali and Barranquilla. DYNA, 86 (211), pp. 258-267, October – December, 2019.
- Consortio MS-GV (2019). Diseño de medidas para las Zonas de Gestión de la Demanda del Transporte ZGDT de Santiago de Cali. Consorcio Movilidad Sostenible y Grupo Vial. Estudio comisionado por Departamento Administrativo de Planeación DAPM de la Alcaldía de Cali.
- Daganzo, Carlos F. (1995). A pareto optimum congestion reduction scheme. Transportation Research B: Methodological. Vol 29, issue 2, pp 139-154.
- Daganzo, C.F. (1985). The uniqueness of a time-dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck. Transportation Science, 19(1), 29-37.
- Daganzo, C.F., & Geroliminis, N. (2008). An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic. Transportation Research Part B, 42(9), 771-781.
- DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (2005). Censo General 2005 - Proyecciones de Población Municipal 2015-2020. Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE, Bogotá, Colombia.
- DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (2016). Encuesta Nacional de Calidad de Vida 2016. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.dane.gov.co>
- DANE - Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://www.dane.gov.co>



- DAPM - – Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2014). Plan de Ordenamiento Territorial POT 2014 - Documento Técnico de Soporte DTS. Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM, Alcaldía de Cali, Cali, Colombia. Obtenido de [http://planeacion.cali.gov.co/pot\\_adoptado/20141201\\_DTS\\_RAPOT.pdf](http://planeacion.cali.gov.co/pot_adoptado/20141201_DTS_RAPOT.pdf)
- DAPM – Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2018). Cali en cifras 2017. Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM, Alcaldía de Cali, Cali, Colombia. Obtenido de:  
<https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/137803/documentos-cali-en-cifras/>
- DAPM – Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2019a). Cali en cifras 2018-2019. Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM, Alcaldía de Cali. Cali, Colombia. Recuperado de <https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/138164/cali-en-cifras/>
- DAPM - Departamento Administrativo de Planeación Municipal (2019b). Plan Integral de Movilidad Urbana - PIMU Visión 2030. Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM, Alcaldía de Cali. Cali, Colombia. Recuperado de:  
[https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/103061/actualizacion\\_pimu\\_vision/](https://www.cali.gov.co/planeacion/publicaciones/103061/actualizacion_pimu_vision/)
- DAPM (2020). Observatorio de Movilidad Sostenible MOVIS. Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM, Alcaldía de Cali. Obtenido de:  
<https://www.cali.gov.co/observatorios/publicaciones/134334/movis/>
- Davidson, K. B. (1966). A flow travel time relationship for use in transportation planning. Australian Road Research Board 3, 183-194.
- De Borger, B. & S. Proost (2001). Reforming transport pricing in the European Union. Edward Elgar, Cheltenham.
- De Borger, B., Proost, S. (2015). The political economy of public transport pricing and supply decisions. *Economics of Transportation*, 4(1–2), 95–109.
- DETR (1994). Trunk Roads and the Generation of Traffic. Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment SACTRA. Department of the Environment, Transport and the Region DETR, London, 1994.
- E.C. European Commission (1995). Towards fair and efficient pricing in transport. Policy options for internalising the external costs of transport in the European Union. Green Paper, Brussels, Belgium.
- E.C. European Commission (1998a). Fair payment for infrastructure use: A phased approach to a common transport infrastructure charging in the EU. White Paper, Com, 466, Final. Brussels, Belgium.



- E.C. European Commission (1998b). The Common Transport Policy. Sustainable mobility: perspectives for de future. Commission Communication to the Council, European Parliament, Economic and Social Committee and Committee of the Regions.
- E.C. European Commission (2001a). White Paper. European Transport Policy for 2010: Time to decide. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities. Brussels, Belgium.
- E.C. European Commission (2001b). EXTRA Consortium for DG Energy and Transport. Transport Research and Technical Development Programme (Transport RTD) Programme for community activities in the field of research, technological development and demonstration for the period 1994 to 1998. European Commission.
- E.C. European Commission (2003). Gestión de la movilidad y concienciación sobre el viaje. E.U. PORTAL - Material Didáctico de Transporte. <http://www.eu-portal.net>
- EEA. European Environment Agency (2000). Transport and Environment Reporting Mechanism TERM 2000. Are we moving in the right direction? Indicators on transport and environment integration in the EU. EEA, Copenhagen.
- Eliasson, J., Jonsson, L. (2011). The unexpected “yes”: Explanatory factors behind the positive attitudes to congestion charges in Stockholm. *Transport Policy*, 18 (4), 636-647.
- ESD –BCC (1999) Environment Strategy Department, Bedfordshire County Council. Pers. comm. 23/11/99.
- ESD –BCC (2000) Environment Strategy Department, Bedfordshire County Council. Pers. comm. 31/01/2000.
- ESD –BCC (2001) Environment Strategy Department, Bedfordshire County Council. Pers. comm. 20/12/2001.
- Eskeland, G. S. and Feyzioglu, T. N. (1995) Rationing Can Backfire: The “Day Without a Car” in Mexico City (Washington, DC: World Bank Policy Research Department, Public Economics Division).
- Faber, O. (1999) Vauxhall Cross Traffic Survey Data Analysis, vols 1 and 2. London Borough of Lambeth, 1999.
- Ferrari, Paolo (1995). Road pricing and network equilibrium. *Transportation Research B: Methodological*. Vol 29B, nº 5, pp 357-372.
- FTA (2004) Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making. Federal Transit Administration, United States Department of Transportation. Washington, DC, USA. August 2004.

- FTA (2006) Applicability of Bogotá's TransMilenio BRT System to the United States. Final Report, Federal Transit Administration, United States Department of Transportation. Washington, DC, USA. May 2006.
- FTA (2009) Federal Transit Administration. United States Department of Transportation. [www.fta.dot.gov](http://www.fta.dot.gov). Visitado el 06/03/2009.
- Fulton, L (2002) Bus Systems for the Future, Achieving Sustainable Transport Worldwide. International Energy Agency. Paris: IEA Books, 2002.
- Geroliminis, N., & Daganzo, C.F. (2008). Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings. *Transportation Research Part B*, 42(9), 759-770.
- Geroliminis, N., & Levinson, D. (2009). *Transportation and Traffic Theory*. Springer Science. Chap. Cordon pricing consistent with the physics of overcrowding, pages 219-240.
- González-Guzmán, C.A. and Robusté, A. (2011) Road Space Reallocation According to Car Congestion Externality. *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 137, No. 3, September 1, 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000070
- Gonzales, E. J. (2011) Allocation of space and cost of multimodal transport in cities. University of California Transportation Center UCTC, University of California, Berkeley. Recuperado de <https://escholarship.org/uc/item/7s28n4nj>
- Goodman, J; Laube, M; and Schwenk, J. (2006) Curitiba's Bus System is Model for Rapid Transit. Race, poverty and the environment, *Journal for social and environmental justice*. Winter 2006.
- Goodwin, Phil. (1997). Solving Congestion. Inaugural lecture for the Professorship of Transport Policy, University College London ([www.ucl.ac.uk/transport-studies/tsu/pbginau.htm](http://www.ucl.ac.uk/transport-studies/tsu/pbginau.htm)), 1997.
- Hau, T. D. (1992). "Economic fundamentals of road pricing" A diagrammatic analysis. World Bank Working Paper, 1070.
- Hau, T. D. (2005a). "Economic fundamentals of road pricing: A diagrammatic analysis, Part I – Fundamentals." *Transportmetrica.*, 1(2), 81-117.
- Hau, T. D. (2005b). "Economic fundamentals of road pricing: A diagrammatic analysis, Part II – Relaxation of assumptions." *Transportmetrica.*, 1(2), 119-149.
- Hendrickson, C., & Kocur, G. (1981). Schedule delay and departure time decisions in a deterministic model. *Transportation Science*, 15(1), 62-77.
- Hidalgo, D. (2002) Transmilenio: A high capacity – Low cost Bus Rapid Transit system developed for Bogotá, Colombia. In *Proceedings of the Tenth International CODATU Conference*, Lome-Togo, 12-15 November 2002.

- Hidalgo, D. (2004) Bus Rapid Transit (BRT): A technical and institutional instrument for urban transporte improvement. The case of Bogotá's TransMilenio. *Infrastructure and Financial Markets Review*. IDB: IFMD. [http://www.iadb.org/sds/IFM/site\\_154\\_e.htm](http://www.iadb.org/sds/IFM/site_154_e.htm)
- Hidalgo, D. (2005a) Comparación de alternativas de transport público masivo – Una aproximación conceptual. *Revista de Ingeniería* n° 21, pp 94-105, mayo 2005.
- Hidalgo, D. (2005b) Personal Communication. November-December 2005.
- Hidalgo, D. (2006) Comparing transit alternatives after recent developments in BRT in Latin America. Presented at the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Borad, Washington, D.C. January 2006.
- Hochstetler, K. and Keck, M. (2004) From Pollution Control to Sustainable Cities: Urban Environmental Politics in Brazil. Working Paper No. CBS-55-04 (Oxford: Centre for Brazilian Studies, University of Oxford).
- Holland, E. P. and Watson P. L (1978). Traffic restraint in Singapore: measuring the effects of the area license scheme. *Traffic Engineering and Control* 19 (1)
- Hook, W. (2009) Bus Rapid Transit: A cost-effective mass transit technology. Air & Waste Management Association. June 26th, 2009.
- IDEAM – Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2018) “Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2017”. Gobierno de Colombia, Ministerio de Ambiente MINAMBIENTE, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM. Julio de 2018. Bogotá, Colombia. ISSN: 2619-2403. [http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72621342/Presentaci%C3%B3n\\_Informe\\_Estad\\_o\\_Calidad\\_Aire+2017.pdf/8a58e842-bc3b-4c91-80ae-71a7188516fa](http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72621342/Presentaci%C3%B3n_Informe_Estad_o_Calidad_Aire+2017.pdf/8a58e842-bc3b-4c91-80ae-71a7188516fa)
- Ison, S.G., and Rye, T. (2005). “Implementing road user charging: the lessons learnt from Hong Kong, Cambridge and Central London.” *Transport Reviews.*, 25(4), 451-465.
- ITDP (2010) Guía de planificación de sistemas BRT. Institute for Transportation & Development Policy. ITDP. New York, USA. Tercera edición 2007, traducción al castellano. Enero 2010.
- IWW/INFRAS (2000). External Costs of Transport. Zürich / Karlsruhe
- Jacobi, P., Segura, D. B. and Kjellen, M. (1999) Governmental responses to air pollution: summary of a study of the implementation of rodizio in São Paulo, *Environment and Urbanization*, 11(1), pp. 79–88.
- Jara-Díaz, Sergio R. (2000). Transporte público urbano: fundamentos microeconómicos. Publicación DIT-DOC/01/2000, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Johnston, R. A., Lund, J. R., and Craig, P. P. (1995). “Capacity-allocation methods for reducing urban traffic congestion.” *Journal of Transportation Engineering ASCE.*, 121(1), 27-39.

- Jones, P. and Hervik, A. (1992) Restraining car traffic in European cities: an emerging role for road pricing, *Transportation Research Part A*, 26A (2), pp. 133–145.
- Koster, P., Verhoef, E., Shepherd, S., Watling, D. (2018). Preference heterogeneity and congestion pricing: The two route case revisited. *Transportation Research Part B: Methodological*, 117, 137-157.
- Leman, Christopher; Schiller, Preston; and Pauly, Kristin (1994). Re-Thinking HOV-High Occupancy Vehicle Facilities and the Public Interest. Chesapeake Bay Foundation ([www.fta.dot.gov/library/planning/RETK/retk.html](http://www.fta.dot.gov/library/planning/RETK/retk.html)), 1994.
- Levine, Jonathan and Garb, Yaakov (2000). Evaluating the Promise and Hazards of Congestion Pricing Proposals; An Access Centered Approach. Floersheimer Institute for Policy Studies (<http://www.fips.org.il/>), 2000.
- Levinson, H. et al. TCRP (2003) Report 90 Bus Rapid Transit. Volume I Case Studies in Bus Rapid Transit. Transit Cooperative Research Program. Washington DC: Transportation Research Board, 2003.
- Li, J. and Zhang, H.M. (2011) Fundamental Diagram of Traffic Flow: New Identification Scheme and Further Evidence from Empirical Data. *Transportation Research Record*. 2011; 2260(1):50-59. doi:10.3141/2260-06
- Lighthill, M.J., & Whitham, G.B. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. In: *Proceedings of the Royal Society of London. A, Mathematical and Physical Sciences*.
- Litman, T. (2001), *Evaluating Transportation Land Use Impacts*, Victoria Transport Policy Institute ([www.vtpi.org](http://www.vtpi.org)).
- Low, Nicholas & Gleeson, Brendan (2003). *Making urban transport sustainable*. Palgrave Macmillan.
- Mahendra, A. (2004) Congestion pricing in cities of the developing world: exploring prospects in Mexico City. Master's thesis in City Planning and Master of Science in Transportation Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. Downloaded At: 14:20 8 February 2010 130 A. Mahendra.
- Mahendra, A. (2008) Vehicle Restrictions in Four Latin American Cities: Is Congestion Pricing Possible? *Transport Reviews*, 28: 1, 105-133.
- Manchón, L. Felipe & Santanera, Juan A. (2003). *Recomendaciones para el proyecto y diseño del viario urbano*. Ministerio de Fomento. Madrid, España.
- May, A.D. & Milne, D. S. (2000). Effects of alternative road pricing systems on network performance. *Transportation Research, Part A*. 34 (2000) 407-436.



- May, A. D., and Roberts, M., (1995) The design of integrated transport strategies. *Transport Policy* 2 (2), 97-105.
- May, A. D. (1994) The potential of next-generation technology. *Curbing Gridlock: peak period fees to relieve traffic congestion 2*. Transportation Research Board Special Report 242, National Research Council. National Academy Press, Washington, D.C.
- May, A.D. (1990) *Traffic flow fundamentals*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1990.
- Matas Prat, Anna (2004). *Políticas de transporte y congestión en áreas urbanas: un panorama*. *Urban Public Economics Review*. N° 1 / 2004.
- Mellors, A. (2000) The M4 bus lane: facts and fiction. *Proceedings of a Landor Conference: Reallocating Road-space: Putting Theory into Practice*, London, 10/2/2000.
- Ministry of Transport (1964) *Road pricing – the technical and economic possibilities*. Report of a Panel set up by the Ministry of Transport. HMSO, London, UK. <https://trl.co.uk/sites/default/files/MISC17.pdf>
- MIT (2006) *Transport as a tool for urban design*. Urban transportation planning, MIT Course. <http://ocw.mit.edu>
- MIT (2002) *Urban transportation, land use, and the environment in Latin America: A case study approach*. Lecture 3: *Transportation strategies, options, examples*. MIT Course. <http://ocw.mit.edu>
- Molina, L. T. and Molina, M. J. (Eds) (2002) *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment* (Dordrecht: Kluwer).
- MVA (1998). *Traffic Impact of Highway Capacity Reductions: Report on Modelling*. Landor Publishing, London, 1998.
- Nagurney, Anna (2000). *Sustainable transportation networks*. Edward Elgar Publishing Limited. UK.
- Nash, C; Sansom, T; and Matthews, B. (2000). *Pricing European Transport Systems PETS*. 4th Framework Programme, final report. University of Leeds, Leeds.
- Nash, C. & Sansom, T (2001). *Pricing European transport systems: Recent developments and evidence from case studies*. *Journal of Transport Economics and Policy*, 35 (3), 363-380.
- Newbery, D.M (1990). *Pricing and congestion: economic principles relevant to road pricing*. *Oxford Review of Economic Policy*, 6 (2), 22-38.
- Newell, G.F. (1971). *Applications of queueing theory*. London: Chapman and Hall.



- Noland, R.B., Gao, D., Gonzáles, E.J., and Brown, C. (2015) Costs and benefits of a road diet conversion. *Case Studies on Transport Policy*. Vol 3, Issue 4, December 2015, pages 449-458
- OCC (2001) Oxfordshire County Council. EMITS Project—Fourth Annual Report 1999–2000. Oxfordshire Council, Oxford, 2001.
- OCDE (1994). Internalising the social costs of transport. European Conference of Ministers of Transport, Paris.
- Oldridge, B. (1990) Electronic road pricing: an answer to traffic congestion? In: *Proceedings of the Information Technology and Traffic Management Conference*. HMSO, London
- OMS. Organización Mundial de la Salud (1999). Health Costs due to Road Traffic related Air pollution. An impact assessment project for Austria, France and Switzerland.
- ONS – Observatorio Nacional de Salud (2018) “Carga de enfermedad ambiental en Colombia – Informe técnico especial 10”. Instituto Nacional de Salud INS, Observatorio Nacional de Salud ONS. Colombia, noviembre de 2018. Recuperado de: <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>
- ONSV – Observatorio Nacional de Seguridad Vial (2018) Siniestros de tránsito – Cifras definitivas enero a diciembre de 2018. Observatorio Nacional de Seguridad Vial, Agencia Nacional de Seguridad Vial, Gobierno de Colombia. Recuperado de: <https://ansv.gov.co/observatorio/index4b78.html?op=Contenidos&sec=59>
- Orski, Kenneth (2001). Carpool Lanes - An Idea Whose Time Has Come and Gone. *TR News* 214 (Special HOV Issue), Transportation Research Board ([www.trb.org](http://www.trb.org)), May-June 2001, pp. 24-26.
- O’Sullivan, A. (1993) *Urban Economics*. Second Edition. 1993, Irwin, Homewood, IL.
- Pigou, A.C. (1920). *The Economics of Welfare*. First edition, McMillan, London.
- Public Transportation Division of North Carolina Department of Transportation. Web-site: [www.ncdot.org/transit/transitnet/](http://www.ncdot.org/transit/transitnet/)
- Pulichino, M., and Coughlin, J. F. (2005). “Introducing transit preferential treatment: Is a political maverick necessary for public transportation to innovate?” *Journal of Urban Planning and Development ASCE.*, 131(2), 79-86
- Pratt, Richard H. (1999). HOV Facilities, Traveler Response to Transportation System Changes. Interim Handbook, TCRP Web Document, DOT-FH-11-9579, 1999.
- Rabinovitch, J. (1993) Urban public transport management in Curitiba, Brazil. *Industry and Environment*, 16 (1-2), pp 18-20.



- RCEP Royal Commission on Environmental Pollution (1994) Eighteenth report: transport and the environment. HMSO, London.
- Read, M. (1992) Wolverhampton: a way ahead. *Traffic Engineering and Control*, 1992, Oct., 552–557.
- Rentziou, A., Milioti, C., Gkritza, K., and Karlaftis, M. (2011). “Urban road pricing: modeling public acceptability.” *Journal of Urban Planning and Development ASCE*. 137 (1), 56-64.
- Richards, Martin G. (2006). *Congestion Charging in London: The policy and the politics*. Palgrave U.K. 2006.
- Richards, M; Gilliam, C; and Larkinson, J. (1996) The London congestion charging research programme: 1. The programme in overview. *Traffic Engineering and Control* 37 (2).
- Richards, P.I. (1956). Shockwaves on the highway. *Operations Research*, 4(1), 42-51.
- Robusté, F. & Sarmiento, I. (1999). *Sistemas tarifarios del vehículo privado en medio urbano*. Ministerio de Fomento.
- Rus, Ginés; & Campos, Javier; Nombela, Gustavo (2003). *Economía del Transporte*. Antoni Bosch Editor, Barcelona, España.
- Salas, M. (2008) *Estrategias tarifarias para la gestión de carreteras metropolitanas*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Santos, Georgina & Newbery, David (2001). *Urban congestion charging: theory, practice and environmental consequences*. Department of Applied Economics, University of Cambridge. UK. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=284156>
- SDG Steer Davies Gleave (2000) *Diseño operacional del sistema TransMilenio*. Proyecto de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá, BIRF 4021-FONDATT-10. Steer Davies Gleave. Bogotá D.C.
- SDG & CNC. (2015). *Encuesta de Movilidad de Cali 2015*. Steer Davies Gleave SDG & Centro Nacional de Consultoría CNC, comisionado por Metro Cali S.A., Cali, Colombia.
- Secretaría del Medio Ambiente (SMA) (2004) *Elementos para la Propuesta de Actualización del Programa “Hoy No Circula” de la Zona Metropolitana del Valle de México* (available at [http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/elementos\\_actualizacion\\_phnc\\_dime.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/elementos_actualizacion_phnc_dime.pdf)) (accessed on 30 March 2007).
- Shefer, D. and Rietvald, P. (1997). Congestion and Safety on Highways: Towards an Analytical Model. *Urban Studies*. Vol. 34, No. 4, 1997, pp. 679-692.
- SMA Secretaría del Medio Ambiente (2004) *Elementos para la propuesta de actualización del programa ‘Hoy No Circula’ de la Zona Metropolitana del Valle de México*



- ([http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/elementos\\_actualizacion\\_phnc\\_dime.pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/download/archivos/elementos_actualizacion_phnc_dime.pdf))
- Small, K. (1992). *Urban transportation economics*. Harwood Academic Publishers.
- Small, K.A., Verhoef, E.T. (2007). *The economics of urban transportation*. London: Routledge.
- Small, K. and Gomez-Ibañez, J.A. (1998). Road pricing for congestion management: The transition from theory to policy; *Road pricing, Traffic congestion and the Environment*, K. J. Button and E. T. Verhoef eds., Edwar Elgar, Cheltenham, UK, 213-246.
- Smith, M.J. (1984). The existence of a time-dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck. *Transportation Science*, 18(4), 385-394.
- Stockholm Partnerships (2002) Winner of the Stockholm Partnerships Awards announced 2002-06-05. *The Stockholm Partnerships for Sustainable Cities*, City of Stockholm Economic Development Agency, 2002.  
<http://www.partnerships.stockholm.se/index.html>.
- Surl, R. (2000) Improving the environmental and economic performance of an historic town through downgrading traffic prioritisation. Shrewsbury's scheme to reduce carriageways. *Proceedings of a Landor Conference: Reallocating Road-space: Putting Theory into Practice*, London, 10/2/2000.
- TfL Transport for London (2005). "Central London congestion charging impact monitoring" Third Annual Report., Transport for London, London, UK.
- The Bus Rapid Transit Policy Center. Web-site: [www.gobrt.org](http://www.gobrt.org)
- TRB Transportation Research Board (2000) *Highway capacity manual 2000*. Transportation Research Board, USA, 2000.
- TRB Transportation Research Board (2010) *Highway capacity manual 2010*. Transportation Research Board, USA, 2000.
- TRB Transportation Research Board (2003) *The transit capacity and quality of service manual*. TCRP Report 100. Transportation Research Board. Washington, D.C. 2003
- Turnbull, Katherine (2001). Evolution of High-Occupancy Vehicle Facilities. *TR News 214 (Special HOV Issue)*, Transportation Research Board ([www.trb.org](http://www.trb.org)), May-June 2001, pp. 6-11.
- UCL – Uniandes (2013) *Cobros de congestión en ciudades colombianas*. University College London UCL y Universidad de los Andes Uniandes. Obtenido de: [https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Cobros-de-congesti%C3%B3n-en-ciudades-Colombianas\\_UCLULA\\_Abril2013.pdf](https://prosperityfund.uniandes.edu.co/site/wp-content/uploads/Cobros-de-congesti%C3%B3n-en-ciudades-Colombianas_UCLULA_Abril2013.pdf)





- Univalle – Universidad del Valle (2013) Estudio de intensidad de tránsito, velocidades, capacidad vial y nivel de servicio en la zona centro de Cali. Universidad del Valle. Estudio comisionado por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM de la Alcaldía de Cali.
- Univalle – Universidad del Valle (2016) Actualización del modelo de transporte de la ciudad de Cali para el uso de entidades centralizadas del gobierno municipal y la elaboración y análisis de escenarios de simulación. Universidad del Valle. Estudio comisionado por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal DAPM de la Alcaldía de Cali.
- UPC - Universidad Politécnica de Cataluña y UB Universidad de Barcelona (2000). Els comptes del transport de viatgers a la Regió Metropolitana de Barcelona., First Edition, Autoritat del Transport Metropolità ATM, Barcelona, España.
- UPME – Unidad de Planeación Minero Energética (2016) “Plan de acción indicativo de eficiencia energética 2017-2022 – Una realidad y oportunidad para Colombia”. Gobierno de Colombia, Ministerio de Minas y Energía MME, Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Colombia, diciembre de 2016. Recuperado de: [https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI\\_PROURE\\_2017-2022.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf)
- U.S. Department of Transportation (2006). Federal Highway Administration. <http://www.international.fhwa.dot.gov>. Visitado en Septiembre 12, 2006.
- U.S Department of Transportation (2006). Managing travel demand: applying European perspectives to U.S. practice. May, 2006.
- U.S Department of Transportation, FTA, Bus Rapid Transit. Web-site [www.fta.dot.gov/brt](http://www.fta.dot.gov/brt)
- Verhoef, E.T. (2002). Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(8), 707-729.
- Vickrey, W. (1955) Some implications of marginal cost pricing for public utilities. *American Economic Review* (papers) 45, Nashville, Tennessee, pp. 605-620.
- Vickrey, W. (1963). Pricing in urban and suburban transport. *American Economic Review: Paper and Proceedings*, 53, 452-465.
- Vickrey, W. (1969). Congestion theory and transport investment. *The American Economic Review*, 59(2), 251-260.
- Viegas, J. M. (2001) Making urban road pricing acceptable and effective: searching for quality and equity in urban mobility, *Transport Policy*, 8, pp. 289–294.
- Vivas P, H. (2004). Sistema de fijación de precios en transporte urbano: transporte público y privado. Documento de trabajo. Departamento de Economía Aplicada, Universidad Autónoma de Barcelona. España.

- VTPI. Victoria Transport Policy Institute (2018). Transportation Demand Management, en TDM Encyclopedia. <http://www.vtpi.org/tdm/>. Visitado en noviembre 1, 2018.
- VTPI. Victoria Transport Policy Institute (2018). Road Space Re-allocation, en TDM Encyclopedia. <http://www.vtpi.org/tdm/tdm56.htm>. Visitado en noviembre 1, 2018.
- Vuchic, V. R. (1992) Public transportation. New Jersey. Prentice Hall. 1992.
- Walters, A.A. (1961). The theory and measurement of marginal private and social costs of highway congestion. *Econometrica*, 29 (4), 676-699
- Wellander, Chris and Leotta, Kathy (2001). Gauging the Effectiveness of High-Occupancy Vehicle Lanes; Applying Three Criteria to Available Data Reveals Benefits, Viability. TR News 214 (Special HOV Issue), Transportation Research Board ([www.trb.org](http://www.trb.org)), May-June 2001, pp. 12-19.
- Williams, D. (1999). Doomsday for drivers in London. The Evening Standard Newspaper, 25 June 1999. London.
- Wright, L. (2004) Module 3b: Bus Rapid Transit. Sustainable Transport: A Sourcebook for Policymakers in Developing Cities. Institute of Transportation and Development Policy. 2004.
- WS ATKINS (2000) Core Traffic Surveys—Interpretation and Analysis. Cambridgeshire County Council, Cambridge, 2000.
- Yang, H. & Bell, Michael G.H. (1997). Traffic restraint, road pricing and network equilibrium. *Transportation Research B: Methodological*. Vol 31, n° 4, pp 303-314.
- Yang, H., and Zhang, X. (2002). "Multiclass network toll design problem with social and spatial equity constraints." *Journal of Transport Engineering ASCE.*, 128(5), 420-428.
- Yang, H. & Zhang, X. (2003). Optimal toll design in second-best arco-based congestion pricing. *Transportation Research Record*. Issue Number 1857, pp 85-92.
- Zegras, C. and Gakenheimer, R. (2000) Urban growth management for mobility: the case of the Santiago, Chile Metropolitan Region. Paper presented at the Lincoln Institute of Land Policy and MIT Cooperative Mobility Program, Cambridge, MA, USA, pp. 23, 143. Downloaded At: 14:20 8 February 2010.
- Zheng, N. & Geroliminis, N. (2013) On the distribution of urban road space for multimodal congested networks. *Transportation Research Part B* 57 (2013) 326–341