



Tecnura

ISSN: 0123-921X

ISSN: 2248-7638

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Rodríguez Polo, Kelly Andrea; Moreno Anselmi, Luis Ángel;
Gaviria Mendoza, Carlos Andrés; Ospina García, Miguel Ángel
Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación en la avenida 68 de la ciudad de Bogotá
Tecnura, vol. 27, núm. 76, 2023, Abril-Junio, pp. 31-53
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DOI: <https://doi.org/10.14483/22487638.17741>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257077761002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

UNEM [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación en la avenida 68 de la ciudad de Bogotá

Operational evaluation of BRT corridor using microscopic simulation on 68' avenue corridor at Bogotá city

Kelly Andrea Rodríguez Polo ¹, Luis Ángel Moreno Anselmi ² Carlos Andrés Gaviria Mendoza ³ Miguel Ángel Ospina García ⁴

Fecha de Recepción: 10 de marzo de 2021

Fecha de Aceptación: 18 de julio de 2022

Cómo citar: Rodríguez-Polo, K. A., Moreno-Anselmi, L. A., Gaviria-Mendoza, C. A., Ospina-García, M. A. (2023). Evaluación operacional del BRT mediante microsimulación en la avenida 68 de la ciudad de Bogotá. *Tecnura*, 27(76), 31-53. <https://doi.org/10.14483/22487638.17741>

Resumen

Contexto: Para solucionar la problemática del transporte público de pasajeros que existía en la ciudad de Bogotá, para el año 2001 inició a operar un sistema de transporte basado en buses de tránsito rápido (BRT, por su sigla en inglés) llamado TransMilenio, que fue construido sobre algunos corredores viales de la ciudad, como la avenida Caracas, Autopista Norte, entre otras. La avenida 68 es una ruta esencial que conecta el suroriente con el noroccidente de Bogotá y forma parte de las etapas donde se adelanta la implementación de correderos para el BRT.

Métodología: En el presente estudio se evaluó un kilómetro de esta avenida, donde se encuentra un tramo crítico de la proyección del futuro BRT que contiene tres intersecciones semaforizadas en la actualidad. Para la zona de estudio, se evalúa una secuencia de etapas que inicia con la instalación de carril exclusivo del BRT en la línea central de la avenida 68 sobre los actuales carriles rápidos en cada sentido del flujo vehicular; posteriormente, la construcción de una glorieta en la intersección con la avenida Suba, y finalmente, la adición de carriles para los vehículos mixtos en el mediano y largo plazo. Para esto se plantea un modelo calibrado en la herramienta VISSIM con los datos de volúmenes aforados en la zona, la composición vehicular y el reporte de velocidades.

Resultados: Mediante la implementación gradual de las modificaciones propuestas se logra mejorar la condición operacional del tramo (incremento de la velocidad promedio de 17 km/h a 35 km/h) que se sostiene en el periodo de estudio.

Conclusiones: La solución permanente a la movilidad requiere la construcción de carriles adicionales para el tránsito mixto que logra una condición operacional similar a las del BRT, y donde la velocidad de operación promedio

¹Ingeniera civil, magíster en Ingeniería. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: kellypolo2012@gmail.com

²Ingeniero civil, magíster en Ingeniería, candidato a doctor de la Universidade de Brasília. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: luis.moreno@unimilitar.edu.co

³Ingeniero civil, magíster en Ingeniería, doctor en Ingeniería. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: carlos.gaviria@unimilitar.edu.co

⁴Ingeniero civil, magíster en Construcción. Docente de la Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Email: miguel.ospina@unimilitar.edu.co

del TransMilenio es de 38 km/h en todo el periodo de estudio y a veinte años.

Palabras clave: buses de tránsito rápido, modelo de seguimiento estocástico, microsimulación, segmentos de vía, intersecciones, VISSIM.

Abstract

Context: In order to solve the problem of public passenger transportation that existed in the city of Bogotá, in 2001 a Bus Rapid Transit (BRT) system called TransMilenio began to operate, which was built on some of the city's road corridors, such as Caracas Avenue and Autopista Norte, among others. Av. 68 is an essential route that connects the southeast with the northwest of Bogotá and is part of the stages where the implementation of BRT corridors is underway.

Methodology: In this study, one kilometer of this avenue was evaluated, where a critical section of the future BRT projection is located, containing three traffic signalized intersections at present. A sequence of stages is proposed and evaluated in the area studied, starting with the installation of an exclusive BRT lane on the center line of Av. 68 on the existing express lanes in each direction of the vehicular route, next the construction of a roundabout at the intersection with Av. Suba and finally, the addition of mixed vehicle lanes. Evaluations are carried out by using calibrated model in the VISSIM software with the volume, vehicle composition and velocity data collected.

Results: The results show that the gradual implementation of the proposed modification improves the operational condition of the roadway segment (average speed increases from 17 to 35 km/h) and is sustained throughout the study period.

Conclusions: The permanent transport solution requires the construction of additional mixed traffic lanes to maintain the operational status of mixed traffic. and where the average operating speed of the Transmilenio is 38 km/h over the entire study period and 20 years.

Keywords: Bus Rapid transit, stochastic tracking model, microsimulation, Roadway Segments, Intersections, VISSIM.

Tabla de contenidos

	Página
Introducción	33
Microsimulación: una revisión	34
Intersecciones semaforizadas	35
Glorietas	35
Pasos a desnivel	36
Microsimulación de corredores del BRT	36
Segmento seleccionado para el estudio	36
Metodología	39
Situación actual	40
Propuesta etapa I: situación actual con la adición del BRT	42
Propuesta etapa II: adición de glorieta en cinco años	42
Propuesta etapa III: adición de carril para vehículos mixtos en diez años	43

Propuesta etapa IV: adición de segundo carril para vehículos mixtos en quince años .	44
Proyección final a veinte años	44
Resultados	44
Conclusiones	47
Agradecimientos	48
Referencias	48

INTRODUCCIÓN

Existe una necesidad latente de las grandes ciudades de incluir sistemas de transporte público que satisfagan las necesidades de sus habitantes. Un gran número de urbes han empezado a planear y desarrollar su sistema de transporte basado en buses de tránsito rápido (BRT, por su sigla en inglés) como solución permanente para la creciente demanda de transporte masivo de pasajeros ([Hook, 2005](#)). Este sistema ofrece capacidad moderada, y demanda un mínimo de capital en comparación con otras formas de transporte que ha propiciado su implementación en países como India, Brasil, Indonesia, etc. Además, ha demostrado ser sostenible para satisfacer los requerimientos de un sistema de transporte masivo ([Chepuri et al. \(2015\)](#), [Hook, 2005](#), [Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, 2019](#)) y acorde con el crecimiento poblacional de las ciudades ([Rangarajan, 2010](#)).

Dentro de la estructura organizacional de las ciudades, o centros poblados, se encuentra el sistema de transporte que involucra las zonas urbanas y las rurales que las rodean ([Lizárraga-Mollinedo, 2006](#)). En este sentido, las dinámicas de crecimiento y expansión de la población demandan unos planes de transporte público que presenten una forma operacional a las condiciones del entorno y factible desde lo económico ([Monzón et al., 2013](#)).

Sin embargo, en la ciudad capital de Colombia, los problemas de congestión vehicular se asocian principalmente a una poca planeación por parte de la administración, al diseño inadecuado de los corredores viales y su sobresaturación, por el aumento no controlado del parque automotor, en vehículos particulares y públicos ([Chaparro, 2020](#)), derivado de las dinámicas de expansión de las ciudades (incremento económico, geográfico y demográfico). Por ejemplo, el problema de movilidad en el municipio de Cachipay (Colombia) ha producido un aumento mínimo de un 46 % en la circulación vehicular por sus calles ([Espinell-Duarte et al., 2018](#)). Esta situación es más severa al considerar que Bogotá presenta zonas críticas en niveles de contaminación del aire ubicados en el norte y sur de ciudad ([Carmona-Aparicio et al., 2016](#)). A esto se suma el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de un sistema de transporte público en decadencia, y que circula debido al bajo rendimiento promedio del combustible durante las horas más congestionadas ([Serafín-González, 2019](#)). A pesar de que un

sistema de BRT representa una solución equilibrada desde la sostenibilidad, la documentación de las experiencias de puesta en uso, por ejemplo, desde el punto de vista operacional o económico, es escasa; en consecuencia, los análisis detallados de las mejores operaciones para la implementación del BRT aún son limitadas (Duduta *et al.*, 2012, Siddique y Khan, 2006).

El BRT de Bogotá, denominado TransMilenio, ha desarrollado tres de sus ocho fases, y continuará con la construcción del corredor sobre la avenida 68, que comunica a Bogotá de suroccidente a noroccidente (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2019). Sin embargo, en algunas de sus intersecciones, como las localizadas entre la calle 98 y la avenida Suba, presenta altos niveles de congestión vehicular, reflejado en un incremento de la longitud de las colas, bajas velocidades de operación bajas y elevados tiempos de viaje en la zona (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014).

La extensión de TransMilenio a través de nuevos corredores de tránsito masivo será de beneficio en los próximos años (Bocarejo, J. P. y Urrego, 2020, Cortés *et al.*, 2020) y es imperativo para el desarrollo de la ciudad. Por tanto, mediante la técnica de microsimulación se estiman las características operacionales de un tramo de 1,0 km que se considera uno de los más críticos del nuevo corredor (avenida 68) del BRT de la capital. Se inicia con una descripción del BRT de Bogotá, la zona de estudio y la metodología usada. Posteriormente se presentan los escenarios seleccionados, a partir de los pasos metodológicos del diseño de intersecciones del *Manual de diseño de carreteras* (Ministerio de Transporte, 2008). A partir de los aforos vehiculares en campo se determina la capacidad actual de la intersección, volúmenes, composición vehicular, y recorridos que se realizan en la intersección. Estos datos se usaron para modelar y calibrar la situación actual mediante el programa VISSIM (*Verkehr In Städten - SIMulation*). Posteriormente se discuten los resultados de las alternativas de modificación del tramo de estudio, las conclusiones y recomendaciones derivadas del análisis.

Microsimulación: una revisión

Variedad de herramientas computacionales son usadas para la modelación de corredores a través de modelos analíticos, empíricos o de simulación estocástica (D'Ambrogio *et al.*, 2009). En particular, uno de los modelos de seguimiento estocástico y velocidades dinámicas más usado para realizar las simulaciones se encuentra disponible en la herramienta VISSIM (*Verkehr In Städten - SIMulation*) (Casares, A. y Galarraga, 2015). Este *software* de microsimulación permite estudiar una porción de la red vial bajo las diferentes intervenciones que se deseen evaluar y predecir los indicadores de tránsito más importantes (Rivera *et al.*, 2011). Además, la microsimulación es la herramienta sugerida para determinar las soluciones más óptimas (Godavarthi *et al.*, 2014), pues ha sido utilizado para caracterizar variedad de comportamiento de los conductores, como los cuellos de botella y otros problemas de tráfico (Raju *et al.*, 2017) y puede ser aplicado en la operación de autopistas, redes urbanas con altos niveles de congestión, análisis

de emisiones y estimar variaciones en los tiempos de retraso y capacidad de una sección de vía (Ratroun y Rahman, 2009). A continuación, se resumen los principales enfoques y conclusiones expuestas por especialistas internacionales más significativas sobre soluciones de tráfico mediante microsimulación.

Intersecciones semaforizadas

Chepuri *et al.* (2015), y Chepuri *et al.* (2018) evaluaron los tiempos de retraso en el tráfico causado por cuatro intersecciones en 1,8 km del corredor del BRT en la ciudad de Surat (India), a través de microsimulación en el software VISSIM. Se encontró que incrementar los tiempos en verde hasta 140 s en la dirección de mayor congestión puede reducir significativamente los tiempos de viaje (hasta 266 s).

Raju *et al.* (2020) estudian la eficiencia en el flujo de tráfico en la intersección semaforizada más congestionada del BRT en la misma ciudad a través de microsimulación. Los escenarios incluyeron el diseño de dos, tres y cuatro fases de control semaforico en la que se demuestra que un control de tres fases es adecuado para estos casos.

Ni *et al.* (2020) analizaron los retrasos en las intersecciones dotadas con semáforos del BRT en Taichung (Taiwan) y mediante un sistema de control pasivo con prioridad, las microsimulaciones mostraron que se puede reducir en un 22 % los tiempos de retrasos del BRT sin afectar el nivel de servicio del tráfico total de la zona, y se incrementa la capacidad de este sistema de transporte.

Glorietas

El uso de glorietas puede mejorar todos los indicadores de tránsito en una intersección urbana (Ipus-Gaviria *et al.*, 2016). Aakre y Aakre (2017) estudian glorietas con carril continuo central de uso exclusivo del BRT que pasa a través de la isla central. Mediante control de tráfico de dos fases se controló el conflicto entre el BRT y los demás vehículos que usan la glorieta. Según los resultados, la microsimulación muestra que este tipo de configuraciones con semáforos pueden inducir importantes reducciones en los retrasos (cero retrasos en BRT y reducción en los demás vehículos) y emisiones del sistema de transporte.

Por su parte, Kawanzi y Benon (2018) en un estudio en Kampala (Uganda), donde las intersecciones operan en condición saturada, se determinó que la implementación de semáforos en las glorietas incrementa la longitud de cola y aumenta los retrasos debido a que se altera el balance en el flujo del tráfico de la glorieta sin señalización.

Pasos a desnivel

Los pasos a desnivel generalmente son la solución más eficiente para una intersección en cuanto a indicadores de tránsito (Ipús-Gaviria *et al.*, 2016, Rincón-Numpaque *et al.*, 2020). Ipús Gaviria *et al.* (2016) evaluaron tres intersecciones urbanas en la ciudad de Montería (Colombia) mediante microsimulación con el *software* Aimsun. Los resultados permitieron identificar que la solución definitiva es la construcción de deprimidos que reducen a un 30 % los tiempos de viaje en cada una de las intersecciones.

Rincón-Numpaque *et al.*, 2020 estudiaron las alternativas de solución a la movilidad para una intersección tipo glorieta que se encuentra operando por encima de su capacidad en la ciudad de Tunja (Colombia). Como resultado, se determinó que los pasos a desnivel permiten incrementar en cerca de cuatro veces la velocidad de circulación actual y mantiene velocidades aceptables en los siguientes veinte años (18,7 km/h).

Microsimulación de corredores del BRT

Las técnicas de simulación microscópica han sido aplicadas para estudiar los corredores del BRT en los últimos años (Chepuri *et al.* (2018), Godavarthi *et al.*, 2014). Siddique y Khan, 2006 estudiaron la capacidad ante altos volúmenes de tránsito en los corredores del BRT de la ciudad de Ottawa (Canadá) mediante el *software* de microsimulación NETSIM. Se encontró que la capacidad arrojada fue entre 22 % y 55 % mayores que las estimadas en el Manual de capacidad de carreteras (HCM por sus siglas en inglés).

Por otra parte, Ancora *et al.* (2012) buscaron desarrollar un nuevo modelo de microsimulación llamado TRANSIMT para integrar la infraestructura, vehículos, configuración de paraderos, estrategias de controles semafóricos y pasajeros, en el análisis que fue empleado para evaluar el desempeño de los corredores del BRT en Roma y que puede ser ajustado a implementaciones del BRT en otras regiones para la configuración de servicio que se ofrezca en dicha zona.

Zheng *et al.* (2020) diseñaron una estrategia de control dinámica para compartir el carril exclusivo del BRT con el tráfico mixto, sin perjudicar su operación con vehículos con tecnología de conectividad integrada, que fue simulado sobre un tramo de BRT en Chengdu (China). En este caso se evaluaron las condiciones de operación libre y sobresaturado; en esta última condición se encontró que los tiempos de espera de los vehículos mixtos pueden ser reducidos sin afectar la operación habitual del BRT.

Segmento seleccionado para el estudio

El sistema de BRT para la capital está planeado sobre las vías arterias (Muñoz González, 2011) en ocho (VIII) fases para alcanzar sus metas de cobertura; actualmente ha puesto en operación las primeras tres (III) etapas compuestas por 114,4 km distribuidos en 11 corredores

(figura 1, línea negra) y 139 estaciones monitoreadas por una estructura de control centralizada (Cortés, 2016, Rodríguez-Polo y Henao-Pérez, 2018). Este sistema, a 2021, reportó una demanda de 34 001 175 pasajeros diarios y una velocidad límite de 60 km/h en los corredores (Global BRT Data, 2020).

Los corredores se encuentran en la categoría oro (más alta de la escala), de acuerdo con la escala adaptada por el Instituto de Transportación y Desarrollo de Políticas (ITDP, por su sigla en inglés). Esta categoría considera que los corredores existentes alcanzan los mejores niveles de desempeño operacional y de eficiencia mientras se provee una alta calidad en el servicio (Instituto de Transportación y Desarrollo de Políticas (ITDP), 2016). El corredor de la avenida carrera 68 forma parte de la siguiente fase a construir, se proyecta que estará disponible para 2025, y cubrirá el sector comprendido entre la autopista Sur y la calle 100 con carrera 7 (una distancia de 17 kilómetros). Sin embargo, en la sección vial de la calle 98 y la avenida Suba (figura 1, línea azul) durante los periodos de máxima demanda se tiene una elevada congestión vehicular, por ser una de las centralidades de la malla vial que brinda acceso a las localidades de Suba, Usaquén, Barrios Unidos y Chapinero, y de conectar con el mayor centro de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014). En consecuencia, se requiere estudiar las alternativas integrales en esta zona del este nuevo corredor del BRT que inicia por estudiar la condición actual, registrar su geometría y acudir a los reportes existentes (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2020), con la finalidad de determinar las soluciones más viables para la adecuada movilidad en este sector.

El tramo de estudio tiene una longitud aproximada de 1,0 km que, en su mayor extensión, está desarrollado sobre una curva horizontal de 1020 m de radio, una pendiente longitudinal del 1 %, dotada de cuatro intersecciones (calle 98, carrera 68A, carrera 64 y av. Suba) con semáforos y sin pasos elevados o deprimidos (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2019). En la figura 2 se muestra el tramo investigado junto con las direcciones de tráfico en la intersección mediante flechas rojas (ingreso) y verdes (salidas).

La avenida carrera 68 es una vía arterial tipo V-2, de acuerdo con las categorías actuales (Ministerio de Transporte, 2008). La sección transversal entre la calle 98 y la avenida Suba consta de un ancho vial de 44,0 m conformado por: a) cuatro calzadas unidireccionales de ancho 7,0 m (dos por sentido de flujo, es decir, un carril lento más uno rápido); b) separadores externos entre carriles en el mismo sentido de 3,0 m, y c) un separador central de hasta 10,0 m. En particular, en las intersecciones con la carrera 68A y la avenida Suba, el separador central se reduce debido al retorno al sur y el carril de giro a la izquierda, respectivamente (Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), 2020). El carril lento aloja tráfico mixto, incluidas rutas de transporte público colectivo, mientras que en el carril rápido transitan los vehículos particulares.

Se realizó un aforo manual por conteo directo en las cuatro intersecciones mediante el aforo de cada una de las entradas y salidas de estas, de manera simultánea. Para determinar la hora de máxima demanda (HDM, por sus siglas en inglés) se sumaron los volúmenes de todas las intersecciones con la finalidad de identificar la tendencia de todo el tramo de estudio.

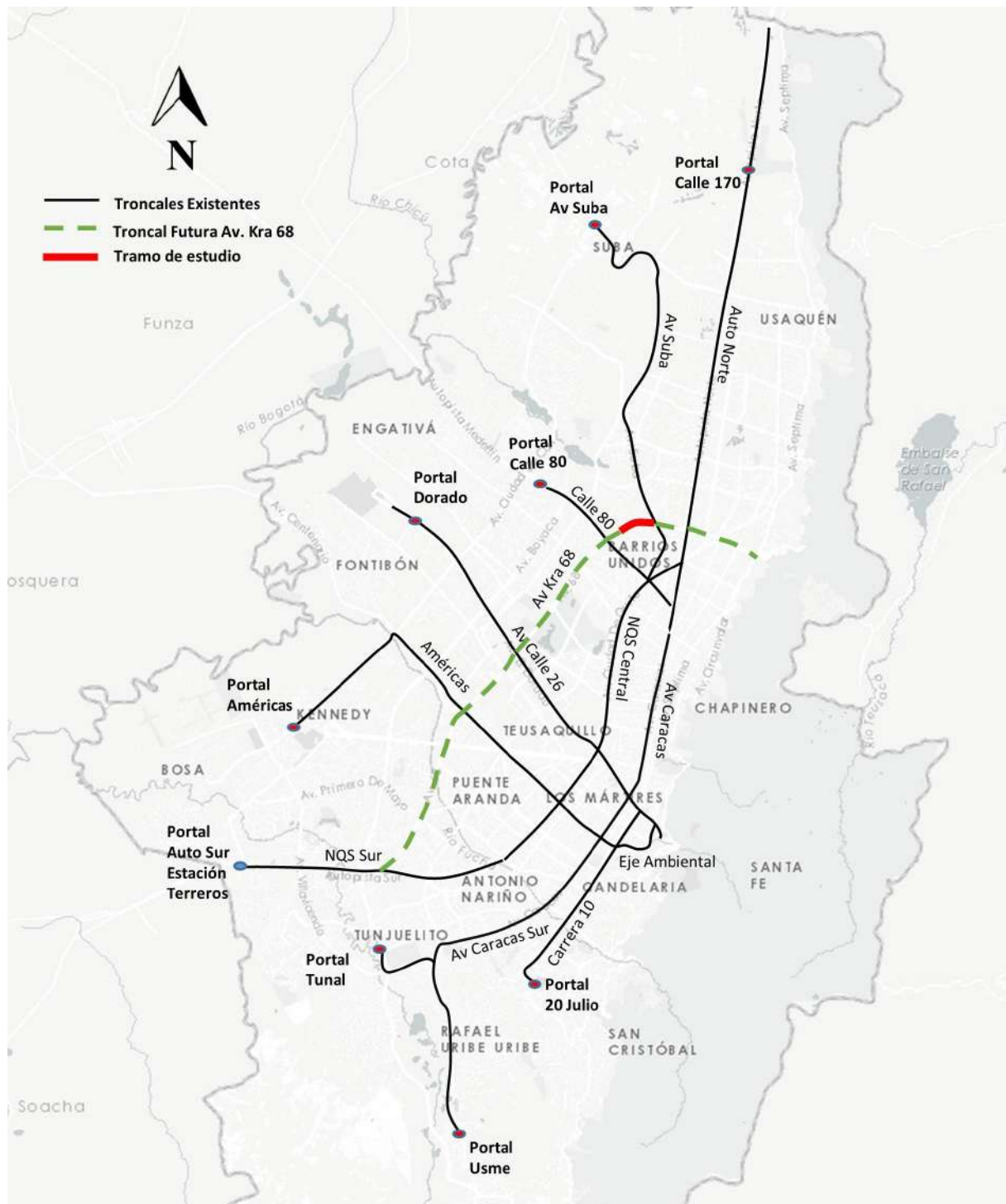


Figura 1. Red de troncales del BRT de Bogotá

Fuente: adaptado de (Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, 2019).



Figura 2. Zona de estudio

Fuente: tomada de ([Instituto de Desarrollo Urbano \(IDU\), 2020](#)).

Tabla 1. Velocidad operacional registrada en el tramo de estudio

Tipo	Sentido	Carril	Velocidad (km/h)
Vehículos exceptuando buses	Sur-norte	Lento	23
		Rápido	13
	Norte-sur	Lento	22
		Rápido	28
Buses	Sur-norte	Lento	19
	Norte-sur	Lento	18

La HDM determinada de esta manera fue entre las 08:45 y 09:45 horas, con un total de 9843 veh./h. En esta hora se procesaron los registros de volúmenes vehiculares por movimiento en cada una de las intersecciones, para ser ingresados en la microsimulación (tabla 2). De igual forma, se registraron las velocidades de operación en este intervalo mediante una pistola de velocidad Speedster III. La tabla 1 consolida los valores registrados en campo. En esta se puede observar que la velocidad más baja (13 km) se registra en la dirección sur-norte (de la calle 98 hacia la avenida Suba) sobre el carril rápido.

Metodología

La necesidad de resolver de manera integral el problema de transporte masivo de pasajeros de Bogotá conlleva estudiar las soluciones viales necesarias para desarrollar las fases futuras de integración. En particular, el tramo de estudio brinda conexión a cuatro localidades de Bogotá; por esta razón, se busca ofrecer una solución balanceada entre el transporte público y

privado que circula por la zona. Con base en la consulta de literatura, con la propuesta de modificaciones de la avenida 68 se busca una construcción gradual de sistema de transporte BRT, específicamente se consideran las recomendaciones del Consejo Nacional de Política Económica y Social ([Departamento Nacional de Planeación \(DNP\), 2010](#)) en el documento No. 3677 de 2010, y que tiene por título *Movilidad integral para la región capital Bogotá, Cundinamarca*.

Como procedimiento de diseño de las propuestas de mejoras y acondicionamiento para el BRT se siguieron los elementos propuestos dentro del Manual de diseño de carreteras ([Ministerio de Transporte, 2008](#)) y la guía de planeación de buses de tránsito rápido ([Wright y Hook, 2007](#)). El prediseño de las diferentes soluciones se realizó con:

- Elementos acotados en el capítulo 7 del *Manual de señalización vial* ([Ministerio de Transporte 2015](#)).
- Esquemas base de intersecciones del *Manual de diseño de carreteras*.
- Los criterios básicos de diseño de las secciones 6.3.2.1 y 6.3.2.2 del *Manual de diseño de carreteras* ([Ministerio de Transporte, 2008](#)).
- El anexo técnico sobre la construcción del sistema TransMilenio de la avenida carrera 68 desde la carrera 9 hasta la autopista Sur ([Instituto de Desarrollo Urbano \(IDU\), 2019](#)).

Se propone una intervención por etapas, con la adopción de un esquema de inversión progresivo en el que se realiza la modelación de cada una de estas seis etapas o escenarios, a partir de la introducción del BRT sobre el carril rápido actual, adición de una glorieta, carriles para vehículos mixtos adicionales y la proyección de la solución total a veinte años. La valoración de las intervenciones se realizó con el *software VISSIM*, debido a las facilidades mencionadas previamente. Los volúmenes de tráfico se proyectaron con una tasa de crecimiento de 1,57 %, según lo indicado en el apartado 6.2.3 del *Manual de diseño geométrico de carreteras* ([Ministerio de Transporte, 2008](#)).

Situación actual

Se inició con la simulación del estado actual del tramo de estudio para contar con un modelo de partida confiable en el *software VISSIM* ([PTV AG, 2015](#)) que se ajustara a los datos recopilados en campo (p. ej., volúmenes y velocidades) y las observaciones de las visitas al sitio (p. ej., puntos de congestión y longitud de colas). En el *software* se ingresaron las condiciones geométricas y los volúmenes vehiculares contabilizados. El ajuste o calibración del modelo se realizaron bajo la metodología expuesta por [Casares, A. y Galarraga, 2015](#), mediante un comparativo de los valores arrojados por la microsimulación con los medidos en las vías. La calibración se llevó a cabo tanto con los datos de volúmenes vehiculares como con las velocidades para las

Tabla 2. Volúmenes vehiculares medidos en campo y del modelo y, el valor GEH entre ambos

Movimiento o ramal	Fuentes o parámetro										GEH				
	Volúmenes medidos en campo					Volúmenes del Modelo									
	(Veh/h)					(Veh/h)									
	Autos	Buses	Camiones	Motos	Total veh.	Autos	Buses	Camiones	Motos	Total veh.	Autos	Buses	Camiones	Motos	Total veh.
Avenida 68 N-S lenta	1062	240	106	251	1659	1056	235	106	250	1647	0,18	0,34	0,00	0,07	0,30
Avenida 68 N-S rápida	2190	0	16	593	2799	2113	0	12	530	2655	1,67	0,04	1,13	2,67	2,76
Calle 98 mov. 3W	425	14	33	61	533	429	18	36	67	550	0,19	1,00	0,51	0,75	0,73
Calle 98 mov. 4E	125	0	9	22	156	147	0	7	24	178	1,85	0,04	0,71	0,42	1,70
Avenida 100 N-S lenta	1248	230	58	64	1600	1286	227	66	122	1701	1,05	0,20	1,02	6,01	2,49
Avenida 100 N-S rápida	1193	0	14	272	1479	1157	0	12	282	1451	1,04	0,04	0,55	0,62	0,73
Carrera 68	672	12	48	60	792	596	14	38	43	691	3,02	0,55	1,46	2,40	3,71
Avenida Suba W-S	127	22	3	19	171	95	21	5	13	134	3,06	0,24	1,09	1,50	3,00
Carrera 64	454	2	13	88	557	455	0	9	75	539	0,04	2,00	1,08	1,72	0,77

entradas y salidas de las cuatro intersecciones. La comparación de estos volúmenes se ejecutó mediante el estadístico utilizado en los estudios de tráfico ([Rincón-Numpaque et al., 2020](#)), denominado factor GEH Geoffrey E. Havers, ecuación (1)). Si al menos el 85 % de los valores GEH se encuentran por debajo de 5, el modelo se considera calibrado en cuanto a volúmenes. El valor de GEH se evalúa mediante la ecuación (1):

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)^2}{M + C}} \leq 5 \quad (1)$$

Donde, M representa los valores obtenidos desde el modelo, y C , los datos medidos en campo. La tabla 2 presenta los volúmenes de los vehículos tomados en campo y los determinados en la evaluación del modelo y el comparativo GEH por tipo de vehículo (casillas sombreadas). Se observa que todos los GEH calculados son inferiores a 5, tanto para cada tipo de vehículo como para el total (máximo valor 3,71); en consecuencia, el modelo se encuentra calibrado en cuanto a volúmenes.

En la figura 3 se muestra la correlación (ajuste por mínimos cuadrados) entre los datos aforados en campo y los resultados arrojados por la simulación, en cuanto a la variable velocidad, donde se logra un nivel de calibración adecuado para un valor mayor o igual al 90 %. En este caso, el valor de R^2 es de 98,68 %; por tanto, el modelo se encuentra calibrado por velocidad.

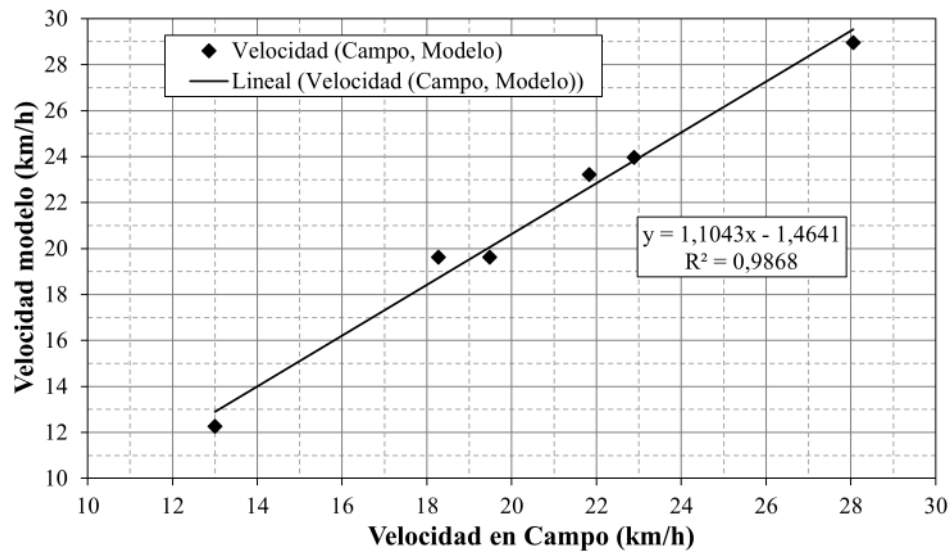


Figura 3. Correlación de la variable velocidad

Fuente: tomada de ([Instituto de Desarrollo Urbano \(IDU\), 2020](#)).

Propuesta etapa I: situación actual con la adición del BRT

Esta propuesta consistió en destinar las calzadas rápidas en ambos sentidos de la avenida 68 para uso exclusivo del BRT (p. ej., norte-sur y sur-norte), con cambio en su geometría en las intersecciones a pasos a desnivel (deprimidos), para evitar las intersecciones semaforizadas y mejores tiempos de desplazamiento por el corredor vial. Lo anterior se soporta en que el incremento de la fase de permanencia en verde de los semáforos para el BRT causa retrasos muy altos en el tráfico de las intersecciones como ha sido reportado ([Chepuri et al. \(2015\)](#), [Siddique y Khan, 2006](#)) y una alta concentración de densidad de vehículos en las intersecciones que se observaron en la simulación del estado actual. Se suspendió el tránsito de los vehículos colectivos de servicio público y el tránsito mixto se trasladó en su totalidad a las calzadas laterales (carril lento inicial). En las intersecciones se mantuvo un tramo del carril rápido para permitir giros a la izquierda que son fundamentales para el acceso a los barrios de la zona de estudio. La estación proyectada para BRT se ubica entre la avenida 68 entre carreras 68A y 65, con ingreso peatonal mediante un puente localizado en la carrera 65.

Propuesta etapa II: adición de glorieta en cinco años

Considerando los estudios previos sobre la combinación de glorietas con pasos elevados y deprimidos como solución alternativa a intersecciones con altos volúmenes de tráfico ([Rincón-Numpaque et al., 2020](#)), se plantea una glorieta en el cruce de la avenida 68 con avenida Suba.

A través de la glorieta se da la integración exclusiva del BRT que actualmente está funcionando sobre la avenida Suba con la propuesta del BRT sobre la avenida 68. Por otra parte, el tráfico mixto sobre la avenida 68 se canaliza a través de un deprimido (hundimiento de los carriles) que cruza bajo la avenida Suba debido a la alta demanda vehicular que circula por esta avenida. Finalmente, el tráfico mixto sobre la avenida Suba mantiene su flujo a través de un paso elevado (puente). De esta manera, se elimina cualquier conflicto entre el los BRT y el tráfico mixto en la intersección.

Para la estimación de los volúmenes, se partió de los volúmenes actuales y el incremento esperado del parque automotor (vehículos mixtos) para las dos localidades en las que se encuentra el tramo de la troncal (p. ej., Suba y Barrios Unidos) que fueron tomados desde la ([Secretaría de Movilidad \(2015\)](#)) que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Tasas anuales de incremento del tránsito estimadas para la ciudad

Localidad	Periodo				Tasa media ponderada por año [%]	Tasa media anual [%]
	2003-2007	2007-2010	2010-2015	2015-2020		
Suba [%]	2,21	2,09	1,97	1,75	2,00	1,57
Barrios Unidos [%]	0,83	0,70	1,99	0,87	1,14	

Los volúmenes futuros calculados a través de la expresión (2):

$$T_f = T_o(1 + r)^n \quad (2)$$

Donde, T_f y T_o son el tránsito futuro e inicial respectivamente; r y n son la tasa de crecimiento anual y el número de años a proyectar, respectivamente. De esta manera, la cantidad de pasajeros y las cifras de buses del BRT requeridos para alcanzar el 90 % de la capacidad de ocupación son estimadas a partir de estas tasas.

Propuesta etapa III: adición de carril para vehículos mixtos en diez años

Debido al incremento en los volúmenes vehiculares en diez años y la demanda latente generada por los vehículos mixtos, como se presenta más adelante, es necesario un carril adicional en la calzada sentido occidente-oriente (de la calle 98 hacia la avenida Suba), con la finalidad de conservar o aumentar las velocidades en los vehículos mixtos y así garantizar la viabilidad de las soluciones propuestas.

Propuesta etapa IV: adición de segundo carril para vehículos mixtos en quince años

Los resultados del escenario de calibración (situación base) muestran que el flujo crítico de vehículos se presenta en la calzada rápida sentido oriente-occidente (velocidades más bajas de todos los movimientos), y que se asocia a los tiempos de espera de los usuarios que realizan maniobras para ir del sur hacia el occidente o retornar al sur. Para responder a esta situación, se adicionó un segundo carril en la calzada de la avenida 68 para el tráfico mixto (de la avenida Suba hacia calle 98) y que buscó mantener unas condiciones operacionales estables del tramo de estudio para la proyección del parque automotor.

Proyección final a veinte años

Al considerar los resultados de la etapa anterior que son presentados más adelante, en una etapa final se procede a validar las propuestas de mejoras en el largo plazo, se mantiene la geometría de la etapa IV y los volúmenes vehiculares proyectados.

RESULTADOS

La figura 4 presenta cada una de las modificaciones para las etapas propuestas. En estas se puede observar las intervenciones sobre la infraestructura actual, en color amarillo se presenta los carriles exclusivos del sistema TransMilenio, las líneas y flechas de color rojo indican los giros a la izquierda junto al separador central (figuras 4A y 4D) para garantizar la accesibilidad al sector. Las líneas de color rojo paralelas a los carriles que se indican en las figuras 4B a 4D corresponden a los carriles de vehículos mixtos adicionales.

A manera de ejemplo se presenta el escenario del tramo de estudio con todas las intervenciones propuestas en la figura 5, la cual ilustra un instante de la simulación para la propuesta final (deprimido+glorieta+carril lento en cada sentido), donde se evidencia el patrón de flujo y las modificaciones sugeridas.

En la figura 6 se visualiza el comportamiento de las velocidades para cada una de las intervenciones y periodos indicados previamente. En esta figura también se observa que, al reducir los vehículos de transporte público sobre el carril mixto debido a la inclusión del BRT (etiquetado como Transmilenio), se incrementa las velocidades tanto de todos los vehículos (de 20,5 km/h a 25,5 km/h) como del BRT comparado con el transporte público actual, debido a que los conductores realizan maniobras sobre los corredores exclusivos sin preocuparse por los vehículos motorizados y peatones (Rangarajan, 2010). Lo anterior indica que el transporte público colectivo que circula por la avenida 68 reduce la capacidad operacional del corredor vial estudiado. Por otra parte, en el escenario de cinco años se presenta que para toda la tipología de vehículos y en ambos sentidos del flujo se aumenta la velocidad operacional, lo cual es



a) Situación actual con la adición del BRT



b) Adición de glorieta y carril para vehículos mixtos en diez años



c) Adición de segundo carril para vehículos mixtos en quince años



d) Solución completa

Figura 4. Modificaciones en el tramo de estudio sobre el software VISSIM



Figura 5. Simulación en el software VISSIM de la solución vial completa en veinte años generado por la sustitución de la intersección semaforizada de la avenida Suba por la glorieta.

La adición de carril para vehículos mixtos en diez años conserva las velocidades promedio, entre 34,30 km/h y 34,19 km/h. De igual forma, el segundo carril para vehículos mixtos en quince años permite conservar este comportamiento, así se logra que la velocidad media del sistema pase de 34,20 km/h a 35,06 km/h. En el largo plazo (proyección a veinte años), se observa que en el caso de los vehículos mixtos se genera un decremento en las velocidades por el aumento de los flujos vehiculares y la velocidad promedio cambia desde 35,06 km/h a 32,85 km/h. La velocidad del sistema TransMilenio se mantiene en el tiempo y se observa que se encuentra dentro de la velocidad media para este tipo de sistema de buses: 30 km/h (Rangarajan, 2010).

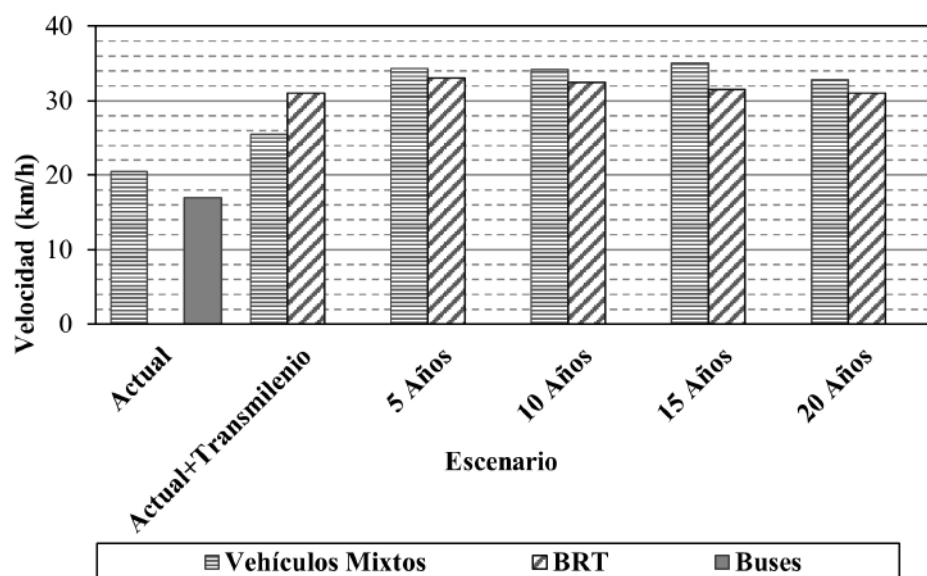


Figura 6. Comportamiento de las velocidades en el tramo de estudio

La figura 7 ilustra el aumento de tráfico en la zona de estudio. Como es de esperarse, la demanda latente en el escenario actual es mínima, ya que corresponde a la condición calibrada. En particular, en las etapas I y II (adición del BRT y glorieta, respectivamente) se presenta la mayor demanda latente, al trasladar el tránsito mixto a las calzadas laterales (calzadas lentas actuales) sin introducir mejoras geométricas a este tipo de vehículos, hecho que confirma que se ha superado la capacidad de la infraestructura. Al introducir un carril adicional para los vehículos mixtos en el sentido occidente-oriente (i.e. 10 años) y oriente-occidente (p. ej., quince años) se logran reducciones de la demanda latente del 5 % y 4 %, respectivamente. Por último, al proyectar cinco años adicionales de funcionamiento con todas las modificaciones (o etapa de intervención) implementadas, se genera un incremento de la demanda latente en un 2 % del volumen total de vehículos, lo cual es una consecuencia de las tres intersecciones semaforizadas para los carriles mixtos y la gran ocupación que presenta el tramo de estudio.

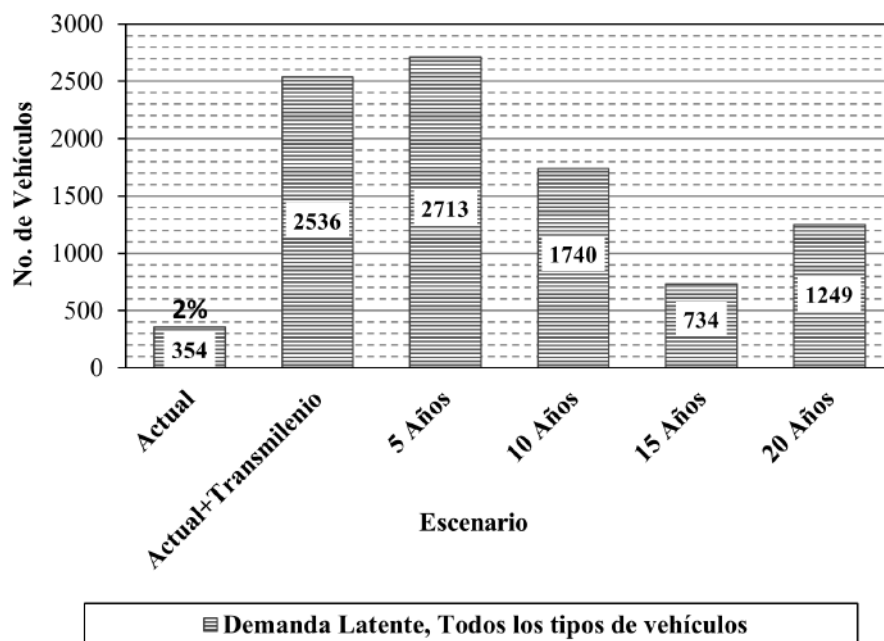


Figura 7. Demanda latente del tramo en la troncal avenida carrera 68

CONCLUSIONES

El programa *VISSIM* ha mostrado ser pertinente para simular el comportamiento actual del tramo de estudio, donde se logró un modelo ajustado con un GEH menor de 4 para los volúmenes registrados en campo, y correlación mayor al 98 % para la velocidad en el tramo de estudio, lo cual soporta el uso de este tipo de programas o algoritmos de seguimiento estocástico para el caso de tramos de vías arteriales.

Una secuencia de soluciones ha sido propuesta para viabilizar la permanencia en el tiempo de un sistema de buses rápidos (llamado TransMilenio) que se busca instalar sobre la avenida 68 y que implica cambios en la geometría, instalación de una glorieta, carriles adicionales para los vehículos mixtos y pasos a desnivel. A través de las simulaciones se encuentra que en el corto como en el largo plazo las velocidades de operación del BRT de Bogotá en esta zona de la troncal de la avenida 68 estarán por encima de la velocidad del sistema de transporte colectivo que circula en esta zona. En particular, la velocidad de operación promedio del TransMilenio es de 38 km/h en todo el periodo de estudio, y a veinte años, se logran velocidades similares tanto en el BRT como en los vehículos mixtos que transitan por el tramo de estudio.

La implementación de carriles adicionales para el tránsito mixto ha demostrado ser un requerimiento indispensable para compensar la demanda latente que surge por la proyección de los volúmenes de tránsito de vehículos mixtos en el tramo estudiado (como se observa en la figura 7). En esta dirección, es necesario establecer políticas adicionales que busquen promover la elección del transporte público masivo y reducir la movilidad en vehículos particulares en la zona para garantizar la sostenibilidad de la red vial a mayor plazo, y reducir los impactos ambientales del transporte.

Este estudio representa un inicio en el análisis de las intervenciones que se deben realizar en las futuras líneas de expansión del BRT que se implementan sobre un carril exclusivo en la bahía central, o carril rápido, de las vías arteriales que componen la ciudad. Este se encuentra condicionado a la información disponible de las condiciones operacionales y las características geométricas del tramo de estudio. Se recomienda incorporar un estudio multiobjetivo en las futuras modelaciones para lograr resultados más integrales en cuanto a tráfico, emisiones y conflictos con los demás agentes (p. ej., peatones) en las intersecciones ([Bahmankhah et al., 2019](#), [Rincón-Numpaque et al., 2020](#)).

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan que este artículo es producto resultado del ejercicio académico como profesor de la Universidad Militar Nueva Granada. Los autores agradecen el apoyo recibido por la institución. Algunos datos de semaforización y geometría de la zona de estudio fueron obtenidos desde la Secretaría de Movilidad de Bogotá. Se agradece el apoyo recibido por parte del ingeniero Lenin A. Bulla-Cruz quien, con sus ideas, observaciones y recomendaciones, ayudó a que se pudiera generar este resultado de investigación.

REFERENCIAS

- Aakre, E. y Aakre, A. (2017). Simulating transit priority: Continuous median lane roundabouts. *Procedia Computer Science*, 109, 849-854. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.400>. ↑Ver página 35
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2014). *Medidas para la movilidad de la ciudad, anunció Pardo*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/medidas-para-la-movilidad-de-la-ciudad-anuncio-pardo>. ↑Ver página 34, 37
- Ancora, V., Nelli, C. y Petrelli, M. (2012). A microsimulation model for BRT systems analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 1250-1259. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.839>. ↑Ver página 36
- Bahmankhah, B., Fernandes, P. y Coelho, M. C. (2019). Cycling at intersections: A multi-objective assessment for traffic, emissions and safety. *Transport*, 34(2), 225-236. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.8946>. ↑Ver página 48
- Bocarejo, J. P. y Urrego, L. F. (2020). The impacts of formalization and integration of public transport in social equity: The case of Bogota. *Research in Transportation Business and Management*, 42, 100560. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100560>. ↑Ver página 34
- Casares, A. y Galarraga, J. (2015). *Calibración del modelo de seguimiento de VISSIM en carreteras multicarriles de Uruguay* [Conferencia]. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da Anpet, 9 a 13 de noviembre, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. http://146.164.5.73:20080/ssat/interface/content/anais_2015/TrabalhosFormatados/AC601.pdf. ↑Ver página 34, 40
- Carmona-Aparicio, L. G., Rincón-Pérez, M. A., Castillo-Robles, A. M., Galvis-Remolina, B. R., Sáenz-Pulido, H. E., Manrique-Forero, R. A. y Pachón-Quinche, J. E. (2016). Conciliación de inventarios *top-down* y *bottom-up* de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Tecnura*, 20(49), 59-74. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04>. ↑Ver página 33
- Chaparro, I. (2002). *Evaluación del impacto socioeconómico del transporte urbano en la ciudad de Bogotá. El caso del sistema de transporte masivo, TransMilenio*. Naciones Unidas, Comisión Económica para América Latina (Cepal), División de Recursos Naturales e Infraestructura, Unidad de Transporte. <https://digitallibrary.un.org/record/482685>. ↑Ver página 33
- Chepuri, A., Raju, N., Bains, M. S., Arkatkar, S. y Joshi, G. (2018). Examining performance of an urban corridor using microscopic traffic simulation model under mixed traffic environ-

- ment in India. *European Transport - Trasporti Europei*, (69), 1-21. http://www.istiee.unict.it/europeantransport/papers/N69/P02_69_2018.pdf. ↑Ver página 35, 36
- Chepuri, A., Kulakarni, R., Singh Bains, M., Arkatkar, S. y Joshi E., G. (2015). Evaluation of BRTS corridor in India using microscopic simulation: A case study in Surat City. En *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* (vol. 10). <https://www.researchgate.net/publication/319443287>. ↑Ver página 33, 35, 42
- Cortés, J. (2016). ¿Cuáles son los grandes retos de un sistema de transporte masivo para Bogotá? Alcaldía de Bogotá. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/cuales-son-los-grandes-retos-de-un-sistema-de-transporte-masivo-para>. ↑Ver página 37
- Cortés, V., Urazán, C. F., & Escobar, D. A. (2020). Accesibilidad territorial urbana ofrecida por la red de TransMilenio según condición socioeconómica. Caso Bogotá (Colombia). *Revista Espacios*, 41(29), 356-370. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n29/a20v41n29p26.pdf>. ↑Ver página 34
- D'Ambrogio, A., Iazeolla, G., Pasini, L. y Pieroni, A. (2009). Simulation model building of traffic intersections. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17(4), 625-640. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2008.11.001>. ↑Ver página 34
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2010). *Documento Conpes de movilidad integral para la región capital Bogotá - Cundinamarca*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3677.pdf>. ↑Ver página 40
- Duduta, N., Adriazola, C., Hidalgo, D., Lindau, L. A. y Jaffe, R. (2012). Understanding road safety impact of high-performance bus rapid transit and busway design features. *Transportation Research Record*, 2317(1), 8-14. <https://doi.org/10.3141/2317-02>. ↑Ver página 34
- Espinell-Duarte, L. E., Ladino-Chaves, O. y Iguarán-Salinas, L. D. (2018). Diagnóstico de los efectos generados por el tráfico de largo destino en la malla vial del municipio de Ca-chipay, Cundinamarca. *Tecnura*, 22(56), 62-75. <https://doi.org/10.14483/22487638.13761>. ↑Ver página 33
- Global BRT Data. (2020). *Mirando ahora mundo*. <https://brtdata.org/>. ↑Ver página 37
- Godavarthi, G. R., Chalumuri, R. S. y Velmurugun, S. (2014). Measuring the performance of bus rapid-transit corridors based on volume by capacity ratio. *Journal of Transportation Engineering*, 140(10), 04014049. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000698). ↑Ver página 34, 36

- Hook, W. (2005). Institutional and regulatory options for bus rapid transit in developing countries: Lessons from international experience. *Transportation Research Record*, 1939(1), 184-191. <https://doi.org/10.3141/1939-21>. ↑Ver página 33
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2019). *Anexo 1. Anexo técnico. Construcción para la adecuación al sistema Transmilenio de la avenida Congreso Eucarístico (carrera 68) desde la carrera 9 hasta la autopista Sur y obras complementarias en Bogotá, D. C.* Alcaldía Mayor de Bogotá. <https://community.secop.gov.co/Public/Archive/RetrieveFile/Index?DocumentId=37793486>. ↑Ver página 34, 37, 40
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2020). *Infraestructura de datos espaciales para el Distrito Capital. Mapas de Bogotá*. <https://mapas.bogota.gov.co/>. ↑Ver página 37, 39, 42
- Instituto de Transportación y Desarrollo de Políticas (ITDP). (2016). *The BRT standard*. <https://www.itdp.org/publication/the-brt-standard/>. ↑Ver página 37
- Ipus-Gaviria, O. N., Chaves-Pabón, S. B. y Riascos-Caipe, M. E. (2016). Evaluación técnica mediante procesos de micro simulación en tres intersecciones en Montería, Córdoba. *Avances Investigación en Ingeniería*, 13(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.253>. ↑Ver página 35, 36
- Kawanzi, A. y Benon, H. (2018). *Assessing the impact of signalization of Kubiri roundabout* [Tesis de grado, Makerere University]. Repositorio Institucional de Makerere University. <http://www.dissertations.mak.ac.ug/bitstream/handle/20.500.12281/6146/kawanzi-CEDAT-Bachelors.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. ↑Ver página 35
- Lizárraga-Mollinedo, C. (2006). Movilidad urbana sostenible: un reto para las ciudades del siglo XXI. *Economía, Sociedad y Territorio*, VI, 1-35. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11162202%5CnEconomía>. ↑Ver página 33
- Ministerio de Transporte. (2008). *Manual de diseño geométrico de carreteras*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/proyectos-de-norma/11313-manual-de-diseno-geometrico-de-carreteras-2008>. ↑Ver página 34, 37, 40
- Ministerio de Transporte. (2015). *Manual de señalización vial*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3825-manual-de-senalizacion-vial-2015>. ↑Ver página 40
- Monzón, A., Ortega, E. y López, E. (2013). Efficiency and spatial equity impacts of high-speed rail extensions in urban areas. *Cities*, 30(1), 18-30. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.002>. ↑Ver página 33

- Muñoz González, N. F. (2011). *Análisis neoinstitucional de la política pública para la reforma del sistema de transporte de Bogotá - Sistema Integrado de Transporte Público SITP - en su aporte a la construcción del derecho a la ciudad y a la movilidad en Bogotá* [Tesis de grado, Pontificia Universidad Javeriana]. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Javeriana. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/1407>. ↑Ver página 36
- Ni, Y.-C., Lo, H.-H., Hsu, Y.-T. y Huang, H.-J. (2020). Exploring the effects of passive transit signal priority design on bus rapid transit operation: a microsimulation-based optimization approach. *Transportation Letters – The International journal of Transportation Research*, 14(1), 14-27. <https://doi.org/10.1080/19427867.2020.1805681>. ↑Ver página 35
- PTV AG. (2015). *PTV VISSIM 8 user manual*. <https://pdfcoffee.com/qdownload/vissim-8-manualpdf-pdf-free.html>. ↑Ver página 40
- Raju, N., Arkatkar, S. y Joshi, G. (2017). *Examining effect of bottleneck on multi-lane roads at midblock sections using simulation* [Conferencia]. ASCE India Conference 2017, diciembre 12-14, Nueva Delhi, India. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784482025.071>. ↑Ver página 34
- Raju, N., Chepuri, A., Arkatkar, S. y Joshi, G. (2020). A simulation study for improving the traffic flow efficiency of an intersection coupled with BRT. *European Transport - Trasporti Europei*, (75), 1-25. <http://www.istiee.unict.it/sites/default/files/files/Paper%201%20n%2075.pdf>. ↑Ver página 35
- Rangarajan, A. (2010). BRTS- Bus Rapid Transit System in Pune modeling, simulation and feasibility analysis. En *Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dhaka* (pp. 781-785). <http://www.ieomsociety.org/paper/167%20Ananth.pdf>. ↑Ver página 33, 44, 46
- Ratrout, N. y Rahman, S. (2009). A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34(1B), 121-133. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4b3a511a8da06ef88af25dc00b93b5646e81f7f5>. ↑Ver página 35
- Rincón-Numpaque, N., Moreno-Anselmi, L. Á., Rodríguez-Polo, K. A. y Gaviria-Mendoza, C. A. (2020). Alternativas de mejoramiento operacional de la movilidad en glorietas usando microsimulación. *Respuestas*, 25(2), 26-36. <https://doi.org/10.22463/0122820X.2372>. ↑Ver página 36, 41, 42, 48
- Rivera, J., Ricci, L., Das-Neves, G., Brizuela, L., Oviedo, M. y Villanueva, M. (2011). *Evaluación sobre retomes de autovías argentinas mediante micro-simulación de tránsito* [Conferencia].

- 8º Congreso de la Vialidad Uruguay, Montevideo, Uruguay. <https://www.researchgate.net/publication/366292225>. ↑Ver página 34
- Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, S. (2018). *Aplicación del modelo de predicción de accidentes en vías de uso exclusivo de BRT, según el manual de seguridad vial (HSM 2010) de Estados Unidos, estudio de caso: ciudad de Bogotá, troncal Caracas* [Conferencia]. XX CLATPU, Medellín, Colombia. <https://www.researchgate.net/profile/Kelly-Rodriguez-2/publication/330661110>. ↑Ver página 37
- Rodríguez-Polo, K. A. y Henao-Pérez, S. (2019). Safety performance functions in Dedicated Bus Lane of BRT on Caracas Avenue Corridor at Bogotá city. *Inge Cuc*, 15(2), 66-77. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.07> ↑Ver página 33, 38
- Secretaría de Movilidad. (2015). *Movilidad en cifras 2015*. Alcaldía Mayor de Bogotá. https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf ↑Ver página 43
- Serafín-González, S. L. (2019). Externalidades de las emisiones del transporte público en Tepic, México: cambio climático y sustentabilidad. *Tecnura*, 23(62), 34-44. <https://doi.org/10.14483/22487638.15455>. ↑Ver página 33
- Siddique, A. J. y Khan, A. M. (2006). Microscopic simulation approach to capacity analysis of Bus Rapid Transit corridors. *Journal of Public Transportation*, 9(3), 181-200. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.9.3.10>. ↑Ver página 34, 36, 42
- Wright, L. y Hook, W. (Ed.). (2007). *Bus rapid transit planning guide*. (3.^a ed.). Institute for Transportation and Development Policy. https://nacto.org/docs/usdg/brt_guide_itdp.pdf. ↑Ver página 40
- Zheng, F., Chen, J., Wang, H., Liu, H. y Liu, X. (2020). Developing a dynamic utilisation scheme for exclusive bus lanes on urban expressways: an enhanced CTM-based approach versus a microsimulation-based approach. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(12), 1657-1664. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0546>. ↑Ver página 36

