



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Actualización y Calibración del Modelo de Asignación de Tráfico de Hora Pico para Vehículo Particular y Estudio del Modelo a través del Análisis de Resultados y Sensibilidad. Aplicación al Caso de Bogotá.**

**Oscar Alejandro Cuellar Cepeda**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2016



# **Actualización y Calibración del Modelo de Asignación de Tráfico de Hora Pico para Vehículo Particular y Estudio del Modelo a través del Análisis de Resultados y Sensibilidad. Aplicación al Caso de Bogotá.**

**Oscar Alejandro Cuellar Cepeda**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magíster en Ingeniería – Transporte**

Director (a):

Ing. William Castro García. MSc.

Línea de Investigación:

Planeación del Transporte

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2016



## Resumen

En el presente documento se reporta el proceso para la actualización y calibración del Modelo de Asignación de Tráfico de Hora Pico para Vehículo Particular. Los aportes de este trabajo incluyen el desarrollo y entrega a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá del modelo de asignación de Tráfico privado calibrado que representa las condiciones de movilidad sobre la red principal de la ciudad, para ser usado como herramienta para el análisis de diferentes políticas y respuesta a otras preguntas de investigación. Adicionalmente, el trabajo provee un análisis sobre la sensibilidad de los flujos de tráfico a algunos atributos importantes de las funciones matemáticas del modelo de asignación tráfico, lo cual sirve para enfocar posteriores esfuerzos en el refinamiento de la herramienta de planeación del transporte.

El documento contiene 5 capítulos. En primera instancia se presenta el contexto, en el cual se define el problema, la justificación y el alcance del trabajo. El segundo capítulo incluye el método y en este se describen los procedimientos y actividades que se desarrollaron. En el capítulo de resultados se presentan los productos generados a partir de cada proceso y segmentados de acuerdo con los objetivos del proyecto, posteriormente se presenta la discusión de los resultados frente a otros estudios de referencia y, por último se presentan las conclusiones más importantes derivadas del desarrollo del estudio.

**Palabras clave: Modelo de transporte, modelo de asignación, asignación del tráfico.**

## **Abstract**

This document reports the process to update and calibrate Assignment Model of Traffic of Peak Hour for Private Vehicle. The contributions of this work include development and delivery to National University of Colombia-campus Bogota of assignment model of private traffic calibrate that represents mobility conditions about main network of the city, for use it like tools to analyze of different politics and answer another investigation questions. Furthermore, this work provides an analysis about the sensibility of traffic flows to some important attributes of the mathematics functions of assignment model of traffic that helps to focus subsequent efforts in refinement tool of transport planning.

The document contains 5 chapters. In the first instance context is presented, in which the problem, justification and scope of work is defined. The second chapter includes method, and here describe the procedures and developed activities. In results chapter shows products generated from each process and segmented according to the objectives of the project, subsequently presented discussion of results against another studies of reference and, by last, presented the most important conclusions derived from the development of the study.

**Keywords: private transport modeling, assignment modeling, traffic assignment.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de tablas.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. Contexto General.....</b>	<b>15</b>
1.1 Los Modelos de Transporte Privado en Bogotá.....	18
1.2 Justificación.....	21
1.3 Problemática.....	23
1.4 Objetivos.....	23
1.4.1 Objetivo General.....	23
1.4.2 Objetivo Específicos.....	23
1.5 Condiciones Generales del Subsistema de Transporte Privado en Bogotá.....	24
<b>2. Método.....</b>	<b>30</b>
2.1 Periodo de Modelación.....	33
2.2 Estructura del Modelo de Asignación.....	33
2.3 Actualización del Modelo de Oferta de Transporte Privado.....	34
2.4 Actualización del Modelo de Demanda.....	39
2.4.1 Zonificación y Conectividad.....	39
2.4.2 Actualización de Matrices Semilla.....	40
2.4.3 Valores Subjetivos del Tiempo.....	44
2.5 Actualización del Modelo de Demanda.....	48
2.6 Precargas del Transporte Público.....	49
2.6.1 Precargas Rutas Urbanas.....	51
2.6.2 Precargas Rutas Intermunicipales.....	52
2.7 Método de Asignación.....	54
2.8 Calibración del Modelo de Transporte.....	57
2.8.1 Volúmenes de Calibración.....	58
2.8.2 Ajuste de Matrices.....	60
2.8.3 Indicadores de Bondad de la Calibración.....	60
2.9 Análisis de Sensibilidad.....	61
2.9.1 Funciones Flujo – Demora.....	61
2.9.2 Valor Subjetivo del Tiempo.....	62
2.9.3 Precargas Asociadas al Transporte Público.....	63
<b>3. Resultados.....</b>	<b>64</b>

3.1	Red de Modelación.....	64
3.1.1	Eliminación de Arcos .....	66
3.1.2	Implementación de Nueva Red de Transporte .....	68
3.1.3	Conectividad .....	69
3.1.4	Atributos de la Red de Transporte .....	71
3.1.5	Cuotas de Peaje .....	76
3.2	Actualización de la Demanda.....	77
3.2.1	Actualización de Matrices Semilla.....	78
3.2.2	Zonificación y Conectividad.....	91
3.3	Precargas del Transporte Público.....	92
3.3.1	Red de Servicios del Transporte Público .....	93
3.3.2	Intervalos de Paso de las Rutas de Transporte Público.....	95
3.3.3	Precarga Asociada a la Operación del Transporte Público.....	98
3.4	Marco de Asignación .....	98
3.5	Calibración del Modelo de Transporte .....	105
3.5.1	Volúmenes de Calibración.....	105
3.5.2	Asignación del Modelo e Indicadores de Bondad de la Calibración ...	108
3.5.2.1	Asignación Inicial .....	109
3.5.2.2	Asignación con Ajuste de Velocidades .....	110
3.5.2.3	Asignación Con Matrices Calibradas .....	111
3.5.3	Indicadores de Bondad de la Calibración .....	116
3.5.4	Matrices Calibradas .....	117
3.6	Calibración del Modelo de Transporte .....	117
3.6.1	Funciones Flujo – Demora .....	118
3.6.2	Valor Subjetivo del Tiempo.....	121
3.6.3	Precargas Asociadas al Transporte Público.....	123
<b>4.</b>	<b>Discusión y Análisis de Resultados.....</b>	<b>126</b>
4.1	La Definición del Periodo Pico .....	126
4.2	La Definición del Periodo Pico .....	132
4.3	La Matriz Obtenida de Viajes en Automóvil .....	138
4.4	El Tiempo de Viaje Modelado .....	139
<b>5.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>143</b>
<b>6.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>145</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>148</b>
	<b>Anexo A. Detalle de los Indicadores de Bondad en Cada Punto de Control .....</b>	<b>149</b>
	<b>Anexo B Representación Gráfica de Matrices Obtenidas del Proceso de Calibración.....</b>	<b>164</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>171</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Proceso de Planeación en Transporte. ....	16
<b>Figura 1-2:</b> Red de Oferta y Zonas de Análisis de Tránsito Modelo de Transporte Privado 2011. ....	19
<b>Figura 1-3:</b> Asignación Escenario Base de Calibración Modelo de Transporte Privado 2011. ....	20
<b>Figura 1-4:</b> Distribución de la Población por Estrato Socioeconómico en Bogotá. ...	24
<b>Figura 1-5:</b> Partición Modal Viajes Urbanos Durante un Día Hábil Típico. ....	25
<b>Figura 1-6:</b> Distribución Horaria de los Viajes Urbanos del Sistema Durante un Día Hábil Típico. ....	25
<b>Figura 1-7:</b> Distribución Horaria de los Viajes Urbanos del Sistema Durante un Día Hábil Típico. ....	26
<b>Figura 1-8:</b> Tiempos Promedios de Viaje en Vehículo Particular por Estrato Durante un Día Hábil Típico. ....	26
<b>Figura 1-9:</b> Distribución de los Viajes en Automóvil por Estrato Durante un Día Hábil. ....	27
<b>Figura 1-10:</b> Tasa de Viaje en Transporte Privado por Persona. ....	27
<b>Figura 1-11:</b> Distribución de la Malla Vial en Bogotá. ....	28
<b>Figura 1-12:</b> Distribución de la Malla Vial en Bogotá. ....	28
<b>Figura 1-13:</b> Tasa de Vehículos por cada 1,000 Habitantes. ....	29
<b>Figura 2-1:</b> Metodología General del Estudio. ....	32
<b>Figura 2-2:</b> Uso de la Herramienta TransCad para la Validación de la Red. ....	35
<b>Figura 2-3:</b> Proceso de Validación de Carriles y Direccionalidad de la Red. ....	36
<b>Figura 2-4:</b> Asignación de Modos de Transporte K (Camiones Pequeños) y H (Camiones Grandes) - Decreto de Carga 520 de 2013, Alcaldía de Bogotá. ....	37
<b>Figura 2-5:</b> Proceso de Validación de la Conectividad en TransCad. ....	38
<b>Figura 2-6:</b> Estaciones de FOV para Actualización de la Tasa de Ocupación de Taxis. ....	43
<b>Figura 2-7:</b> Distribución Porcentual del Tipo de Vehículo por Estrato. ....	47
<b>Figura 2-8:</b> Distribución Porcentual del Tipo de Vehículo por Estrato. ....	50
<b>Figura 2-9:</b> Trabajo de Campo - Estudio de Frecuencia de Rutas. ....	53
<b>Figura 2-10:</b> Localización Estudios de Frecuencia de Rutas Intermunicipales. ....	54
<b>Figura 2-11:</b> Diagrama General del Modelo de Asignación. ....	57
<b>Figura 2-12:</b> Proyecto Hipotético Autopista Regional de Occidente. ....	62
<b>Figura 3-1:</b> Selección de Arcos Eliminados Relacionados a la Red Troncal. ....	66

<b>Figura 3-2:</b>	Selección de Arcos Eliminados Asociados a Accesos, Salidas o Conexiones de Red de Transporte Masivo.....	67
<b>Figura 3-3:</b>	Selección de Arcos Eliminados Complementarios que No Definen la Red de Oferta. 68	
<b>Figura 3-4:</b>	Arcos Nuevos en la Red de Oferta.....	69
<b>Figura 3-5:</b>	Nodos Potenciales con Errores de Conectividad.....	70
<b>Figura 3-6:</b>	Ejemplo de Error de Conectividad de la Red. ....	70
<b>Figura 3-7:</b>	Transporte Habilitada para Vehículos Livianos (Modo C). ....	71
<b>Figura 3-8:</b>	Red de Transporte Habilitada para Camiones Pequeños (Modo K) - Cambiar. 72	
<b>Figura 3-9:</b>	Red de Transporte Habilitada para Camiones Grandes (Modo H)- Cambiar. 73	
<b>Figura 3-10:</b>	Red de Transporte Habilitada para el Transporte Masivo (Modo T). ....	74
<b>Figura 3-11:</b>	Cambios en la Caracterización de Carriles de la Red de Oferta. ....	75
<b>Figura 3-12:</b>	Intensidad de la Oferta de Carriles.....	75
<b>Figura 3-13:</b>	Peajes Implementados en el Modelo de Transporte. ....	77
<b>Figura 3-14:</b>	Vectores de Ocupación Vehículo Particular.....	79
<b>Figura 3-15:</b>	Segmentos de Demanda para el Vehículo Privado. ....	80
<b>Figura 3-16:</b>	Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 1 y 2. ....	80
<b>Figura 3-17:</b>	Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 3. ....	81
<b>Figura 3-18:</b>	Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 4. ....	82
<b>Figura 3-19:</b>	Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 5 y 6. ....	83
<b>Figura 3-20:</b>	Matriz Semilla Vehículos Privado Suburbano. ....	84
<b>Figura 3-21:</b>	Análisis Ocupación de Taxis Observado en Bogotá.....	85
<b>Figura 3-22:</b>	Matriz Semilla Vehicular, Taxi Lleno. ....	86
<b>Figura 3-23:</b>	Matriz Semilla Vehicular, Taxi Vacío.....	87
<b>Figura 3-24:</b>	Matriz Semilla Vehicular, Motocicletas.....	88
<b>Figura 3-25:</b>	Semilla Vehicular, Camiones Pequeños.....	89
<b>Figura 3-26:</b>	Matriz Semilla Vehicular, Camiones Grandes.....	90
<b>Figura 3-27:</b>	Validación de Ubicación de Centroides en la ZAT.....	91
<b>Figura 3-28:</b>	Conectores del Modelo de Transporte.....	92
<b>Figura 3-29:</b>	Rutas de Transporte Sistema TransMilenio.....	93
<b>Figura 3-30:</b>	Rutas del Sistema Integrado de Transporte Público. ....	94
<b>Figura 3-31:</b>	Rutas de Transporte Público Intermunicipal. ....	94
<b>Figura 3-32:</b>	Asignación del Modelo de Transporte Público.....	97
<b>Figura 3-33:</b>	Precarga Asociada a la Operación del Transporte Público.....	98
<b>Figura 3-34:</b>	59 Macro General de Asignación del Modelo de Transporte. ....	99
<b>Figura 3-35:</b>	Puntos de Control Calibración de Automóviles, Taxis y Motocicletas. ....	106
<b>Figura 3-36:</b>	Puntos de Control Calibración de Camiones Pequeños.....	107
<b>Figura 3-37:</b>	Puntos de Control Calibración de Camiones Grandes.....	108
<b>Figura 3-38:</b>	Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Asignación Inicial. ....	109
<b>Figura 3-39:</b>	Red de Transporte Con Ajuste de Funciones.....	110

<b>Figura 3-40:</b>	Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Asignación Con Ajuste de Funciones. ....	111
<b>Figura 3-41:</b>	Asignación General de Automóviles – Modelo Calibrado.....	111
<b>Figura 3-42:</b>	Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.....	112
<b>Figura 3-43:</b>	Asignación General de Taxis – Modelo Calibrado.....	112
<b>Figura 3-44:</b>	Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.....	113
<b>Figura 3-45:</b>	Asignación General de Motocicletas – Modelo Calibrado. ....	113
<b>Figura 3-46:</b>	Dispersión del Volumen de Motocicletas Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.....	114
<b>Figura 3-47:</b>	Asignación General de Camiones Pequeños – Modelo Calibrado.....	114
<b>Figura 3-48:</b>	Dispersión del Volumen de Camiones Pequeños Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado. ....	115
<b>Figura 3-49:</b>	Asignación General de Camiones Grandes – Modelo Calibrado. ....	115
<b>Figura 3-50:</b>	Dispersión del Volumen de Camiones Grandes Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.....	116
<b>Figura 3-51:</b>	Tramo de la Avenida Boyacá Objeto de Análisis.....	120
<b>Figura 3-52:</b>	Asignación Autopista Regional de Occidente – VOTs de Calibración	121
<b>Figura 3-53:</b>	Asignación Autopista Regional de Occidente – VOTs de Sensibilidad	122
<b>Figura 3-54:</b>	Comparación de Volumen de Automóviles Escenario Base Vs. Escenario Sin Precargas.....	123
<b>Figura 3-55:</b>	Comparación de Dispersión de Automóviles Escenario Base Vs. Escenario Sin Precargas.....	124
<b>Figura 3-56:</b>	Ojivas Relativas del GEH Escenario Calibrado y Escenario Sin Precarga del Transporte Público.....	125
<b>Figura 4-1:</b>	Perfil Horario de Viajes en Desarrollo Asociados a Bogotá – Análisis de Automóviles.	127
<b>Figura 4-2:</b>	Perfil Horario de Viajes en Desarrollo Asociados a Bogotá–Análisis del Sistema.	128
<b>Figura 4-3:</b>	Ubicación de Estudios de Aforos Usados para el Análisis del Periodo Pico.	129
<b>Figura 4-4:</b>	Perfil Relativo de Flujos Vehiculares Sobre la Red de Transporte de Bogotá – Análisis de Vehículos Livianos.....	130
<b>Figura 4-5:</b>	Perfil Relativo de Flujos Vehiculares Sobre la Red de Transporte de Bogotá – Análisis del Sistema.....	131
<b>Figura 4-6:</b>	Distribución GEH Modelo de Automóviles. ....	134
<b>Figura 4-7:</b>	Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados Modelo de Privados 2011. ....	135
<b>Figura 4-8:</b>	Desarrollo de la Prueba de Hipótesis.....	137
<b>Figura 4-9:</b>	Casos de Viajes que se Calibran en el Modelo. ....	139
<b>Figura 4-10:</b>	Tiempo de Viaje Histórico en Vehículo Particular Según Reporte Anual de Movilidad.	140

<b>Figura 4-11:</b>	Distribución de los Tiempos de Viaje Urbanos Modelado vs. Encuesta de Movilidad.	140
<b>Figura 4-12:</b>	Tiempos de Viaje Promedios en Hora Pico por ZAT–Resultados del Modelo.	141
<b>Figura 6-1:</b>	Matriz Calibrada de Viajes Urbanos en Vehículo Particular.....	164
<b>Figura 6-2:</b>	Matriz Calibrada de Viajes Suburbanos en Vehículo Particular. ....	165
<b>Figura 6-3:</b>	Matriz Calibrada de Viajes en Taxi.....	166
<b>Figura 6-4:</b>	Matriz Calibrada de Viajes en Motocicleta. ....	167
<b>Figura 6-5:</b>	Matriz Calibrada de Viajes de Camiones Pequeños.....	168
<b>Figura 6-6:</b>	Matriz Calibrada de Viajes de Camiones Grandes.....	169

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Parámetros Estimados en Funciones de Demora. ....	61
<b>Tabla 3-1:</b> Tipologías y Cambios en la Red de Modelación [14]. ....	65
<b>Tabla 3-2:</b> Cuotas de Peaje para Segmentos de Demanda del Modelo [14]. ....	76
<b>Tabla 3-3:</b> Dimensiones de las Matrices Semilla Obtenidas [14]. ....	78
<b>Tabla 3-4:</b> Características Operativas Rutas Intermunicipales [14]. ....	95
<b>Tabla 3-5:</b> Resumen Indicadores Operacionales Servicios Urbanos [14]. ....	97
<b>Tabla 3-6:</b> Dimensiones de las Matrices Calibradas [14]. ....	117
<b>Tabla 3-7:</b> Indicadores de Bondad Análisis de Sensibilidad de Funciones de Demora [14].	120
<b>Tabla 6-1:</b> Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Automóvil [14]. ....	149
<b>Tabla 6-2:</b> Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Automóvil [14]. ....	152
<b>Tabla 6-3:</b> Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Automóvil [14]. ....	155
<b>Tabla 6-4:</b> Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Camiones Pequeños [14].	158
<b>Tabla 6-5:</b> Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Camiones Grandes [14].	161

## Lista de Símbolos y abreviaturas

CxC	Cargas por Congestión
DANE	Departamento Nacional de Estadística
OD	Origen Destino
EOD	Encuesta Origen Destino
EODH	Encuesta Origen Destino en Hogares
EODI	Encuesta Origen Destino de Interceptación
FOV	Frecuencia y Ocupación Visual
HDM	Hora de Máxima Demanda
IDU	Instituto de Desarrollo Urbano
JICA	Agencia de Cooperación Internacional de Japón
SITP	Sistema Integrado de Transporte
TGM	Tasa de Generación Media de Viajes
TPC	Transporte Público Colectivo
UPTC	Universidad Pedagógica y Tecnológica de Tunja
VOT	Valor del tiempo
ZAT	Zona Análisis de Tránsito

# 1.Contexto General

Los sistemas de transporte están compuestos no solo de los elementos físicos y organizacionales que interactúan entre ellos para producir oportunidades de transporte, sino de la demanda que toma dichas oportunidades para satisfacer sus necesidades (Cascetta, 2009). La definición de modelo en el contexto de esta propuesta de investigación es la “representación lógica matemática y simplificada de un sistema o proceso, es decir una abstracción de la realidad más compleja con el propósito de representarla” (Banks y Sokolowski, 2012). Este trabajo se centra en la representación de un sistema de transporte urbano.

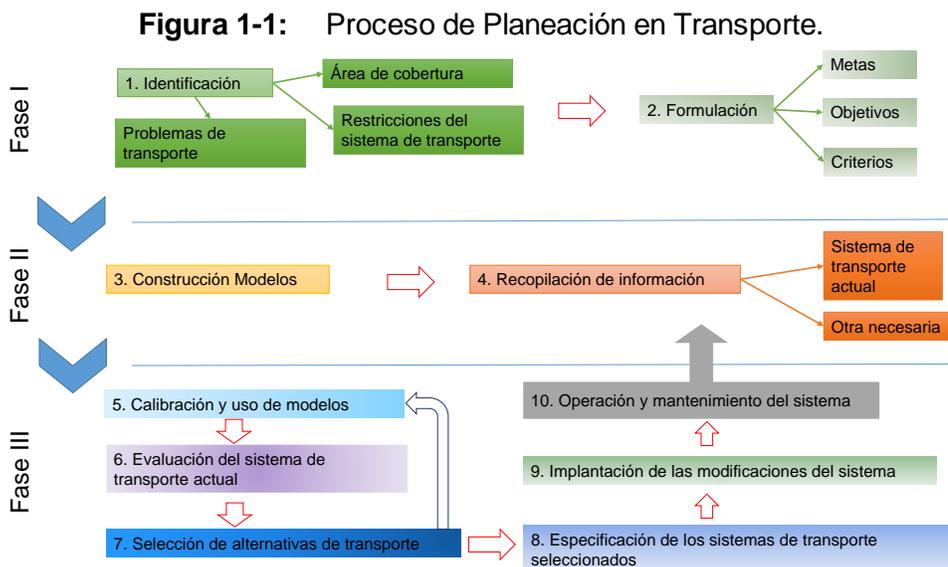
La complejidad de la red de infraestructura, las variaciones temporales y espaciales de la demanda, los niveles de medidas de control de tráfico y el comportamiento estocástico de los usuarios, hacen de la modelación matemática de los sistemas de transporte, una tarea compleja en su naturaleza (Mohan y Ramadurai, 2013). Pese a dicha complejidad, los modelos matemáticos aplicados al transporte se han consolidado como una herramienta importante para la planeación de las ciudades y regiones, en su nivel táctico como en su nivel estratégico (Ortúzar y Willumsen, 2011).

Los modelos matemáticos-computacionales de tráfico empezaron a usarse desde 1950, y fueron originalmente desarrollados para evaluar los impactos de los cambios de la red de transporte propuestos (Banks y Sokolowski, 2012). En las décadas de los 60 y 70 con el aumento vertiginoso del tráfico vehicular en las vías urbanas y rurales, numerosos investigadores y científicos se dieron a la tarea de entender y representar la dinámica de los flujos vehiculares en las redes de transporte, y obtener una descripción matemática de este proceso (Thomas y Schofer JI, 1970). Dichos investigadores provienen de diversas ramas del conocimiento, la matemática, física, ingeniería, investigación de operaciones; todas estas han contribuido al desarrollo de la literatura sobre modelación de transporte,

lo que ha hecho que existan diferentes aproximaciones a la representación del sistema. Para una completo listado sobre las diferentes aproximaciones, remitirse al capítulo 1 del artículo “Traffic and related self-driven many-particle systems” (Helbing, 2001).

La mayoría de modelos, actualmente en la literatura, pueden clasificarse de acuerdo con el nivel de detalle que utilizan para representar el sistema de transporte: modelos macroscópicos, microscópicos y mesoscópicos. Cada uno de ellos es formulado con el propósito de representar distintos aspectos con diferentes niveles de detalle del sistema de transporte. El interés de esta investigación es sobre los modelos macroscópicos, los cuales resultan en la agregación de la dinámica de vehículos individuales en un flujo, y se enfocan principalmente en describir fenómenos agregados como la congestión, demoras promedio y formación de colas. Estos modelos son de gran importancia en el análisis de redes de gran escala, muy pertinente para el caso de Bogotá, y para aplicaciones donde las características macro del tráfico (velocidad, densidad y flujo) son de primordial importancia (Burrell y Dick AC, 1969).

Cuarenta y cinco años después, los modelos de transporte embebidos en el proceso de planeación urbana y de transporte (Figura 1-1), se han consolidado como una herramienta que permite evaluar las intervenciones en los sistemas de transporte y racionalizar la inversión de recursos públicos en el sector, apoyando la toma de decisiones de la política pública de movilidad especialmente en zonas urbanas (Mohan y Ramadurai, 2013) (Helbing, 2001).



*Fuente: Elaboración propia a Partir de Molinero 1997.*

Bogotá, no ha sido ajena a esta situación, y en la última década ha consolidado sus herramientas de planeación de transporte (ej. Modelo de transporte de Cuatro Etapas, Modelo de Asignación de Vehículos Privados, Modelo de Operación de Transporte Público). Esto ha sido posible, en parte, por el interés de los tomadores de decisiones, en el análisis riguroso de alternativas de política pública y estrategias que buscan aliviar las externalidades del transporte urbano. En especial, soportado por aquellos actores que creen que políticas y estrategias planteadas deben ser producto de análisis técnicos integrales y esto se logra mediante un adecuado diagnóstico, que permita el diseño y la formulación de proyectos que se adecuen a las condiciones propias del territorio.

En el marco de este proceso de consolidación de las herramientas de planeación, Bogotá ha continuado invirtiendo en la recolección de información para la caracterización de los patrones de viaje de sus ciudadanos. En el 2015 actualizó la encuesta de movilidad del Distrito y 16 municipios vecinos (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). Adicionalmente, las dinámicas propias de la ciudad, han inducido cambios en la operación del sistema de transporte, (e.g. variaciones en las medidas de pico y placa, crecimiento del parque de motocicletas, entrada en operación del SITP). Por su parte, la comunidad científica también ha avanzado en la investigación de las condiciones propias del flujo vehicular local, produciendo adaptaciones locales para la representación de las condiciones particulares de la red vial en Bogotá (Márquez, García, y Guarín, 2014).

En concordancia con lo anterior, el objetivo de este trabajo de grado, es actualizar el modelo de asignación de tráfico de vehículo privado, incorporando las actualizaciones de información de la oferta y la demanda en el sistema del transporte.

Los aportes de este trabajo incluyen el desarrollo y entrega a la Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá del modelo de asignación de Tráfico privado calibrado que representa las condiciones de movilidad sobre la red principal de la ciudad en año 2015, para ser usada como herramienta en el análisis de diferentes políticas y respuesta a otras preguntas de investigación. Adicionalmente, el trabajo provee un análisis sobre la sensibilidad de los flujos de tráfico a algunos atributos importantes de las funciones matemáticas del modelo de asignación tráfico, lo cual sirve para enfocar posteriores esfuerzos en el refinamiento de la herramienta de planeación del transporte.

## 1.1 Los Modelos de Transporte Privado en Bogotá

A continuación se analizan los antecedentes de la investigación relacionados con la información para la caracterización de la demanda y la estructuración de modelos de transporte privado anteriores. Una de las fuentes de información establecidas y reconocidas por profesionales e investigadores de la planeación de transporte son las encuestas de viaje en hogares, también llamadas encuestas Origen - Destino (EODH). Estas permiten mediante un proceso aleatorio de muestreo caracterizar la demanda de acuerdo a la variación temporal, la revelación de la escogencia modal, los patrones origen-destino, índices, motorización y muchas otras características socioeconómicas de la población. (EURO Working Group on Transportation, Meeting, Patriksson, y Labbé, 2002). En el caso particular de esta investigación, las encuestas EODH 2015 y 2011 son usadas para la actualización de la demanda en el año de modelación.

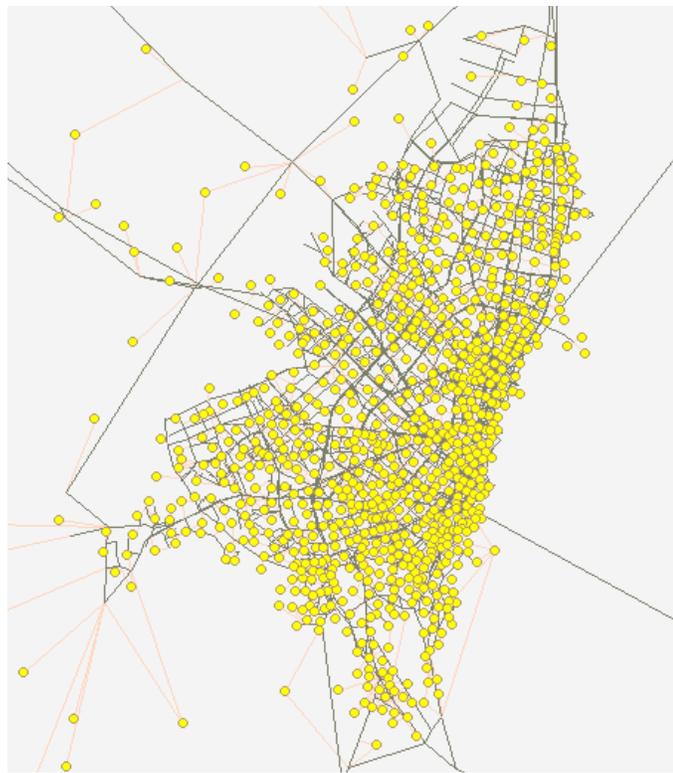
Bogotá cuenta con cuatro EODH cada una de ellas vinculada a un proceso importante de definición de política de transporte en la ciudad. La primera EODH fue adelantada por Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) en el año 1995 en el marco de la formulación del primer “Plan de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá” cuyo objeto fue la priorización de inversiones en materia de infraestructura vial. La segunda EODH fue desarrollada por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) en 2005, y fue el soporte del Plan Maestro de Movilidad de Bogotá, adoptado mediante Decreto 319 de 2006. La tercera EODH fue realizada en 2011 por la empresa Steer Davies Gleave, y fue el soporte principal para la estructuración de la primera línea de metro de Bogotá. La más reciente EODH está siendo elaborada por el Consorcio TransConsult-Informetrika desde el año 2015.

En el segundo grupo de antecedentes, relacionado con los modelos de asignación transporte privado, se tiene conocimiento de diversos modelos originados por el sector privado como parte de los análisis que ejecutan como interesados en el desarrollo de proyectos de transporte. Aquellos que han servido como herramienta para la estructuración de políticas de transporte son el modelo estructurado por Cal y Mayor en el 2005 como aporte a la formulación del Plan Maestro de Movilidad y los modelos desarrollado por Steer Davies Gleave en 2011 y 2014, este último estructurado para el evaluación del proyecto de Cobros por Congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013).

Es importante destacar que los modelos que se desarrollan a partir de cada una de la EODH, incorporan los patrones de viaje de la demanda definidos en cada caso, pero también se complementan en algunos casos con encuestas de viaje por interceptación. Igualmente, los modelos se calibran nuevamente para el año base a partir de los volúmenes de control medidos empíricamente. Sin embargo, estos se consideran modelos acumulativos, en tanto incluyen patrones de viaje de la demanda anteriores.

Como se mencionó, el modelo actual transporte vehículos privados de la Bogotá-Región fue desarrollado en el año 2014 a partir de la EODH 2011. Este modelo está estructurado en el software de planeación de transporte Emme 4.0, cuenta con 945 zonas de análisis de tráfico - ZAT (Bogotá y 17 municipios vecinos), contempla una red de 6,500 nodos, 22,000 links que representan la oferta vial principal asociada a cada tipología e incluye cerca de 1,200 rutas de transporte público. En la Figura 1-2 se presenta la red vial, los centroides de las ZATs y los conectores asociados a cada zona.

**Figura 1-2:** Red de Oferta y Zonas de Análisis de Tránsito Modelo de Transporte Privado 2011.



*Fuente: Elaboración Propia a Partir de Modelo de Cobros por Congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013).*

En el modelo de transporte de referencia están definidos un total 22 modos de transporte dentro de los que se incluyen: automóvil, taxi y motocicleta (c), camiones pequeños (k) y camiones grandes (h), las matrices asociadas al periodo pico para estos modos de transporte se definen como mf620 (demanda de vehículo privado), mf623 (demanda motocicletas), mf621 (demanda taxi ocupado), mf624 (demanda camión pequeño) y mf625 (demanda camión grande). El proceso asignación que se realiza para los viajes en transporte privado y para los viajes en taxi, considera las precargas asociadas a las motocicletas, los taxis vacíos y los camiones, en una primera instancia las matrices asignadas son segmentadas de acuerdo al estrato socioeconómico de la zona de origen (estrato 1 y 2, estrato 3, estrato 4 y estratos 5 y 6). Considerando que son matrices vehiculares posteriormente se asocian a un vector de ocupación que permite convertir las matrices de viajes en matrices de vehículos, las cuales son asignadas sobre la red ya precargada.

**Figura 1-3:** Asignación Escenario Base de Calibración Modelo de Transporte Privado 2011.



*Fuente: Elaboración Propia a Partir de Modelo de Cobros por Congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013).*

## 1.2 Justificación

De acuerdo con los últimos reportes anuales de movilidad que periódicamente son emitidos por el observatorio de movilidad de la Cámara de Comercio de Bogotá (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015), durante los últimos años se ha presentado en Bogotá fuertes cambios en la movilidad y el reparto modal, aumentado la participación de modos de transporte poco amables y eficientes como lo son el automóvil y la motocicleta. Esto se ha traducido en incrementos en la congestión, la contaminación y los tiempos de viaje. Aunque estas y otras externalidades negativas del transporte representan una parte importante de la problemática, quizá el impacto más importante tiene lugar en la productividad de la ciudad y en la calidad de vida de la población. Es por eso que es necesaria la intervención a partir de la formulación de políticas públicas de transporte.

Las políticas públicas se pueden definir como el conjunto de sucesivas interacciones, decisiones y acciones del régimen político frente a situaciones socialmente problemáticas y que buscan la resolución de las mismas o llevarlas a niveles manejables (Vargas, 1999). Para el logro de objetivos existen criterios susceptibles de medición que permiten elaborar y tomar las mejores decisiones, siendo esta el fruto de un cálculo objetivo que facilita la selección de manera científica y abstracta de la mejor opción (Roth, 2002). En este contexto, la planeación del transporte consiste en la formulación de políticas que persigan la consecución de objetivos y metas para el mejoramiento del sistema de movilidad.

De acuerdo a lo anterior, los planeadores del transporte tienen la responsabilidad de consolidar un sistema sostenible, para lo cual es importante contar con un modelo de transporte actualizado, que represente de manera correcta la oferta, la demanda y su interacción; con las condiciones de sensibilidad necesarias para analizar el impacto de diferentes proyectos en el campo de la movilidad, dando soporte técnico en el análisis de variables que influyen en la toma de decisiones y retroalimentando otros componentes como el ambiental.

A partir del modelo de transporte formulado para el análisis de cobros por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013) y haciendo uso de la encuesta de movilidad desarrollada en 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015), se realiza la actualización del modelo de transporte privado. Se incorporan cambios en la representación matemática

de la oferta, en la programación y otros técnicos que buscan mejorar la precisión del modelo. De igual manera se realizan análisis de sensibilidad asociados a elementos estructurantes del modelo para estudiar la robustez de la calibración.

Existen dos aspectos importantes que permitirán la mejora de una de las herramientas de planeación de transporte de Bogotá, el modelo de asignación de vehículo privado: los indicadores agregados de la EODH 2015 que proporciona información útil para la actualización de la demanda y la inclusión del transporte público como un generador de congestión.

En este punto es importante destacar los cambios que ha presentado tanto la oferta como la demanda de transporte en la ciudad de Bogotá, dentro de estos cambios se pueden destacar:

- Modificaciones en los periodos de restricción del pico y placa (Alcaldía Mayor de Bogotá, Decreto 575 de 2013), (Alcaldía Mayor de Bogotá, Decreto 690 de 2013).
- Tasas de crecimiento anuales del parque de automóviles superiores al 8% según la (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).
- Aumento en la cantidad de motocicletas de 145.197 en el 2011 a 424.588 en el 2014 según la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá.
- Implementación de nuevas troncales del sistema TransMilenio: Carrera 10, Calle 26, Extensión a Soacha, Integración Carrera 7, entre otros.
- Restructuración del transporte público e implementación el Sistema Integrado de Transporte Público (SITP).
- Generación de nuevas zonas francas, desarrollos inmobiliarios, comerciales y de servicios, entre otros.

Tanto las matrices como los modelos deberían ser actualizados de manera periódica para maximizar los beneficios de contar con información continua. Aunque se pueda contar con información parcial, los modelos integrales no deberían ser puestos al día más de una vez cada 12-18 meses (Ortúzar y Willumsen, 2008).

## **1.3 Problemática**

Además de generar una metodología que permita actualizar el modelo de transporte privado visto como una herramienta de planeación útil para la comunidad educativa y las entidades encargadas de la planeación de la Ciudad de Bogotá, el trabajo busca responder a la siguiente pregunta: ¿En qué medida se afecta diferentes indicadores del modelo de transporte privado de la hora pico de la mañana de la ciudad de Bogotá ante cambios en elementos estructurantes como las funciones de demora, el valor del tiempo y la saturación derivada de la operación del transporte público?

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Calibrar el modelo de transporte privado de la Ciudad de Bogotá para la hora pico de la mañana de un día hábil típico del año 2015, haciendo uso del software Emme 4.0; generando desde la academia una herramienta para la planeación del sistema de transporte de la ciudad.

### **1.4.2 Objetivo Específicos**

- Actualizar la oferta de transporte privado de Bogotá D.C. a las condiciones de 2015 que alimentan el modelo de transporte, mediante el uso de sistemas de información geográfica que contienen los atributos requeridos.
- Estimar las matrices semilla que se constituyen en la demanda base para la calibración del modelo, partiendo matrices definidas en estudios anteriores que se actualizarán por medio de análisis de indicadores de movilidad.
- Desarrollar una estructura y programación del modelo mediante el desarrollo de macros en el software Emme 4 que permitan representar la demora generada por la operación del transporte público y las tarifas de peaje, mejorando así la representación del modelo de elección de ruta.
- Calibrar el modelo de demanda de transporte privado para la hora pico de la mañana a las condiciones de 2015 con el fin de asegurar un adecuado nivel de confianza del mismo, esto a partir representación en el modelo tanto de volúmenes vehiculares como de indicadores operacionales que se midieron en campo.

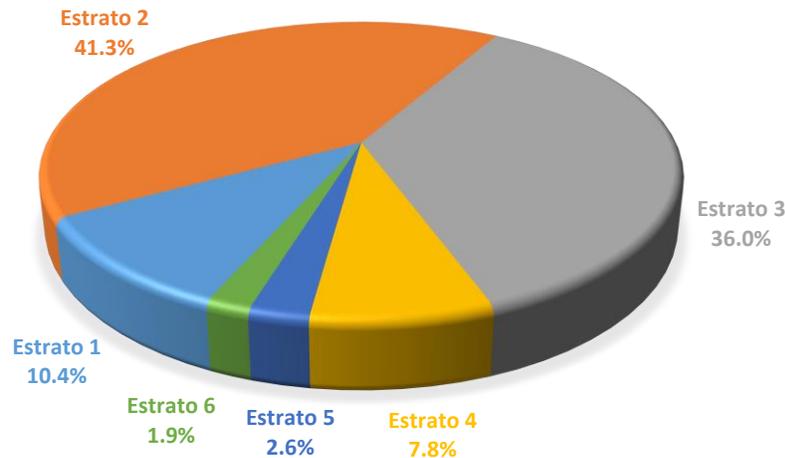
- Realizar un análisis de la sensibilidad de indicadores del modelo ante la influencia de diferentes parámetros de la oferta y la demanda: funciones volumen-demora, valor del tiempo y consideración de demoras asociadas a la operación del transporte público; lo anterior buscando conocer la respuesta de variables relacionadas con operación y con indicadores de calibración.

## 1.5 Condiciones Generales del Subsistema de Transporte Privado en Bogotá

Con el fin de contextualizar la relevancia del modo de transporte privado dentro de la movilidad de Bogotá, se presentan en este capítulo diferentes indicadores de movilidad de los viajes que se desarrollan en una ciudad de 7,980,001 habitantes (DANE, 2008), gran parte de los indicadores presentados se definieron con base en la encuesta de movilidad de 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). Es importante hacer claridad acerca de que los datos presentados para la encuesta de movilidad de 2015, son el resultado del análisis de viajes de días hábiles típicos que se desarrollan en la capital (viajes con origen y/o destino en Bogotá) que no consideran los viajes peatonales menores a 15 minutos.

Dado que buena parte de los indicadores se generaron a nivel de estrato, en la Figura 1-4 se presenta la distribución de población de Bogotá de acuerdo a su estrato socioeconómico.

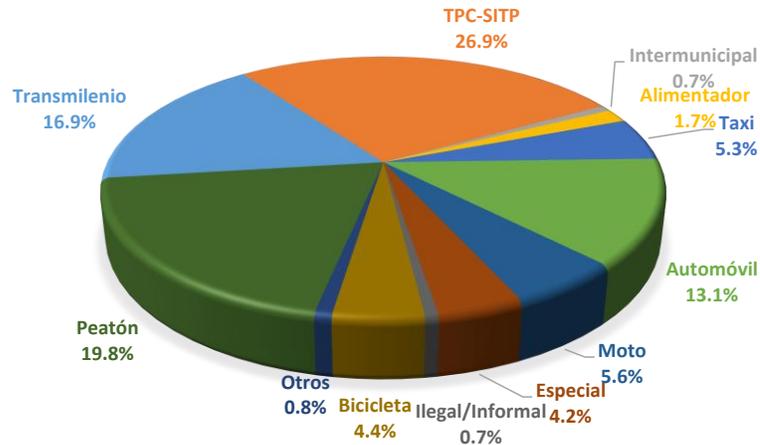
**Figura 1-4:** Distribución de la Población por Estrato Socioeconómico en Bogotá.



Fuente: *Elaboración Propia a Partir de Informe Bogotá Ciudad de Estadísticas 2014 (Secretaría Distrital de Planeación, 2014).*

Los viajes acotados de acuerdo con lo descrito en el párrafo anterior, suman un total de 11,138,929 viajes. La distribución modal de los mismos, se presenta en la Figura 1-5 donde se resalta una participación del automóvil del 13.1%, que representan alrededor de 1,454,083 viajes diarios.

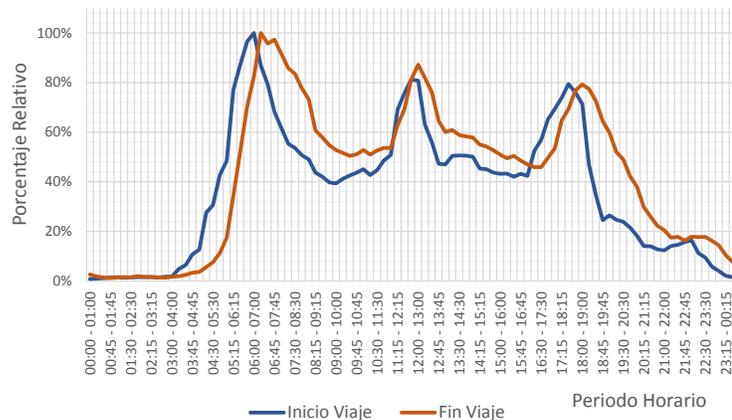
**Figura 1-5:** Partición Modal Viajes Urbanos Durante un Día Hábil Típico.



*Fuente: Elaboración Propia a Partir de Encuesta de Movilidad de Bogotá 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

La Figura 1-6 muestra el perfil del momento de inicio y finalización para el segmento de viajes analizados, a lo largo del día se evidencian 3 periodos pico y 2 valles. El periodo horario comprendido entre las 6:00 y las 7:00 horas representa el periodo en que mayor cantidad de viajes tienen inicio.

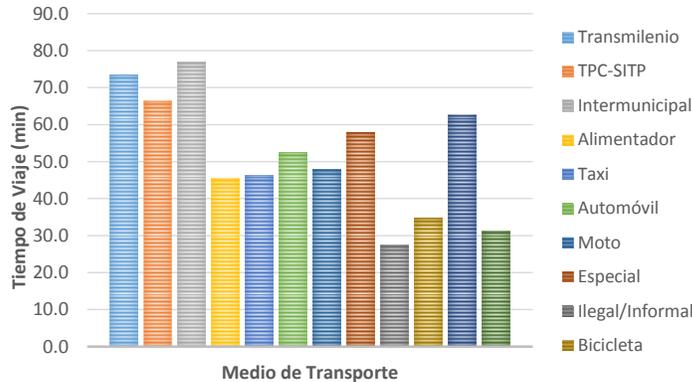
**Figura 1-6:** Distribución Horaria de los Viajes Urbanos del Sistema Durante un Día Hábil Típico.



*Fuente: Elaboración Propia a Partir de Encuesta de Movilidad de Bogotá 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

El tiempo de viaje medio del segmento analizado es de 55 minutos, la Figura 1-7 muestra los tiempos promedio de viaje para cada uno de los modos disponibles en el sistema de transporte. Durante un día típico la duración promedio de los viajes que se realizan en automóviles es de 52 minutos.

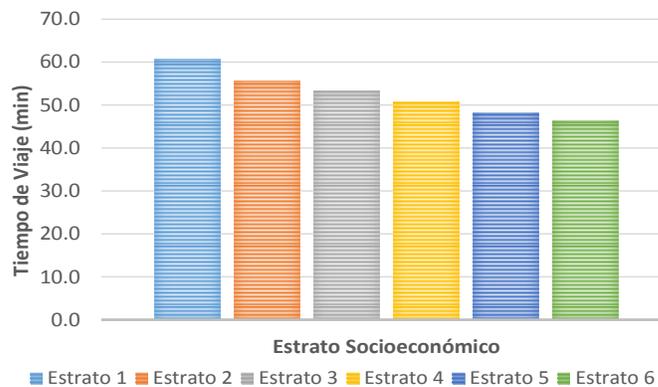
**Figura 1-7:** Distribución Horaria de los Viajes Urbanos del Sistema Durante un Día Hábil Típico.



*Fuente: Elaboración Propia a Partir de Encuesta de Movilidad de Bogotá 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

Al analizar los tiempos de viaje medios por estrato se puede apreciar una relación inversamente proporcional, de esta manera mientras los viajeros del primer estrato tienen un tiempo promedio de desplazamiento de 61 minutos, los viajeros de estrato 6 invierten en promedio para cada viaje 46 minutos. Los resultados se muestran en la Figura 1-8.

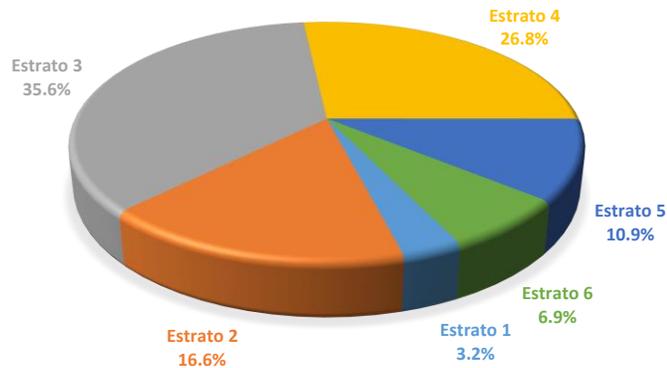
**Figura 1-8:** Tiempos Promedios de Viaje en Vehículo Particular por Estrato Durante un Día Hábil Típico.



*Fuente: Elaboración Propia a Partir de Encuesta de Movilidad de Bogotá 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

Los viajes realizados en automóvil con origen y/o destino en Bogotá se distribuyen por estrato según la Figura 1-9. Sin embargo, únicamente el 3.5% de los viajes estrato 1 son realizados en automóvil, asociado al estrato 2 este valor es del 4.8%, para el estrato 3 representa el 11.6%, para el estrato 4 el 30.0% de los viajes usan auto, mientras los viajeros de estrato 5 y 6 realizan el 43.9% de los viajes se realizan en automóvil.

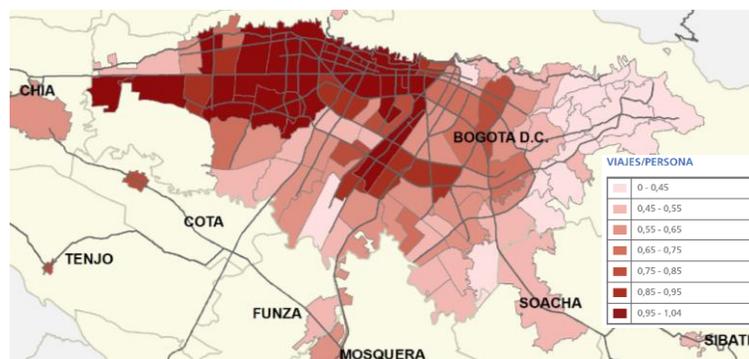
**Figura 1-9:** Distribución de los Viajes en Automóvil por Estrato Durante un Día Hábil.



*Fuente: Elaboración Propia a Partir de Encuesta de Movilidad de Bogotá 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

La tasa de viajes en transporte privado per cápita en Bogotá se presenta a nivel de zona en la Figura 1-10. Al analizar la tasa de generación media de viajes (TGM) en automóvil por estrato se obtiene para el estrato 1 una TGM de 0.11 viajes/persona, para el estrato 2 una TGM de 0.19 viajes/persona, para el estrato 3 una TGM de 0.30 viajes/persona, para el estrato 4 una TGM de 1.00 viajes/persona, para el estrato 5 una TGM de 1.40 viajes/persona y para el estrato 6 una TGM de 1.65 viajes/persona.

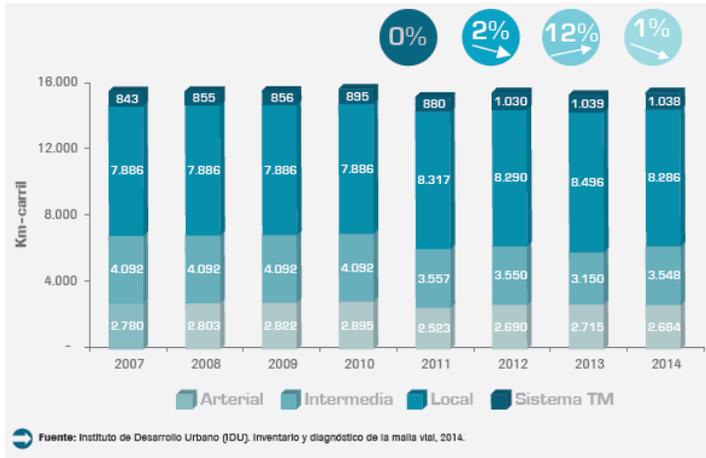
**Figura 1-10:** Tasa de Viaje en Transporte Privado por Persona.



*Fuente: Tomada de Informe de indicadores Encuesta de Movilidad de Bogotá 2011 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2011).*

La red vial disponible para el desarrollo de los viajes en automóvil durante el año 2014 fue de 14,158 kilómetros – carril, sin embargo según el inventario y diagnóstico de la malla vial desarrollado en 2014 por el IDU (IDU, 2014): el 15% de la malla vial arterial, el 30% de la malla vial intermedia y el 56% de la malla vial local, se encuentran en mal estado. La oferta histórica de la malla vial de la ciudad y su composición se muestra en la Figura 1-11.

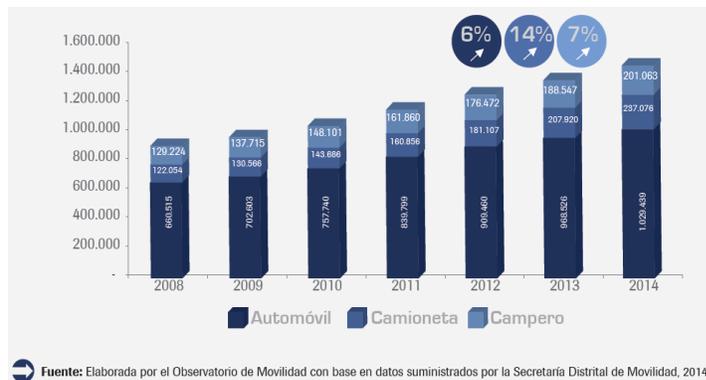
**Figura 1-11:** Distribución de la Malla Vial en Bogotá.



Fuente: Tomada de Reporte Anual de Movilidad 2014. Observatorio de Movilidad (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

El parque automotor de Bogotá ha venido creciendo de manera acelerada, de acuerdo con la Secretaría Distrital de Movilidad, la tasa de crecimiento en el periodo 2008 – 2014 para automóviles, camionetas y camperos fue del 6%, 14% y 7% respectivamente. La evolución histórica del parque automotor particular de la ciudad se puede observar en la Figura 1-12.

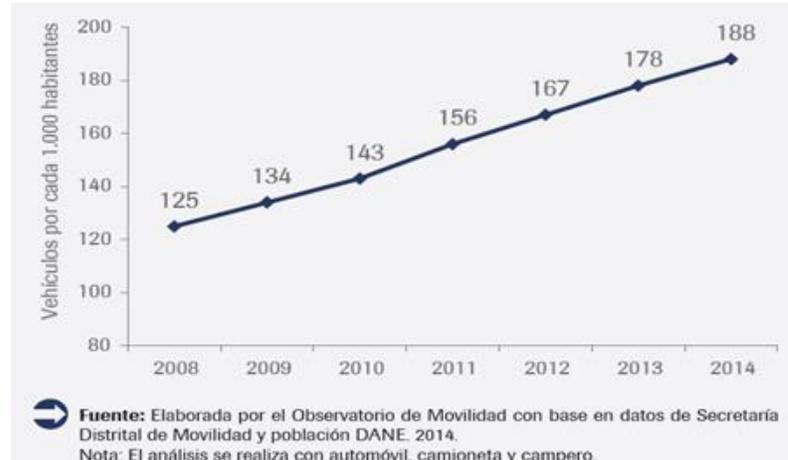
**Figura 1-12:** Distribución de la Malla Vial en Bogotá.



Fuente: Tomada de Reporte Anual de Movilidad 2014. Observatorio de Movilidad (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

El último indicador que se consideró de interés como contexto al estudio desarrollado, corresponde a la tasa de motorización. En la Figura 1-13 se presenta para el periodo 2008 - 2014 los cambios en la tenencia de vehículo en Bogotá. Mientras en el 2014 existían 5.3 habitantes por vehículo, de acuerdo con la encuesta de movilidad de JICA, en el año 1995 el índice de motorización de Bogotá para ese año fue de 12.1 habitantes por *vehículo*.

**Figura 1-13:** Tasa de Vehículos por cada 1,000 Habitantes.



*Fuente: Tomada de Reporte Anual de Movilidad 2014. Observatorio de Movilidad (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).*

## 2. Método

La estructuración de un modelo de transporte privado que represente adecuadamente la oferta, la demanda y el comportamiento de las personas para movilizarse en el territorio, es el fin del trabajo desarrollado, que busca aportar una herramienta importante para el ejercicio de la planeación de la Ciudad de Bogotá. Con el anterior objetivo se enfocaron todos los esfuerzos en estructurar el modelo de transporte privado de la situación base que corresponde a la hora pico am de un día típico del año 2015.

Este capítulo busca explicar de manera detallada, el método y procedimientos empleados para actualizar el modelo de transporte de la ciudad de Bogotá, considerando que el modelo se definió en una gran medida a partir de información disponible, se hace énfasis tanto en los datos de referencia como en la recopilada de manera directa en campo, dicha información se constituyó en la base para la actualización de cada uno de los elementos que conforman el modelo de transporte.

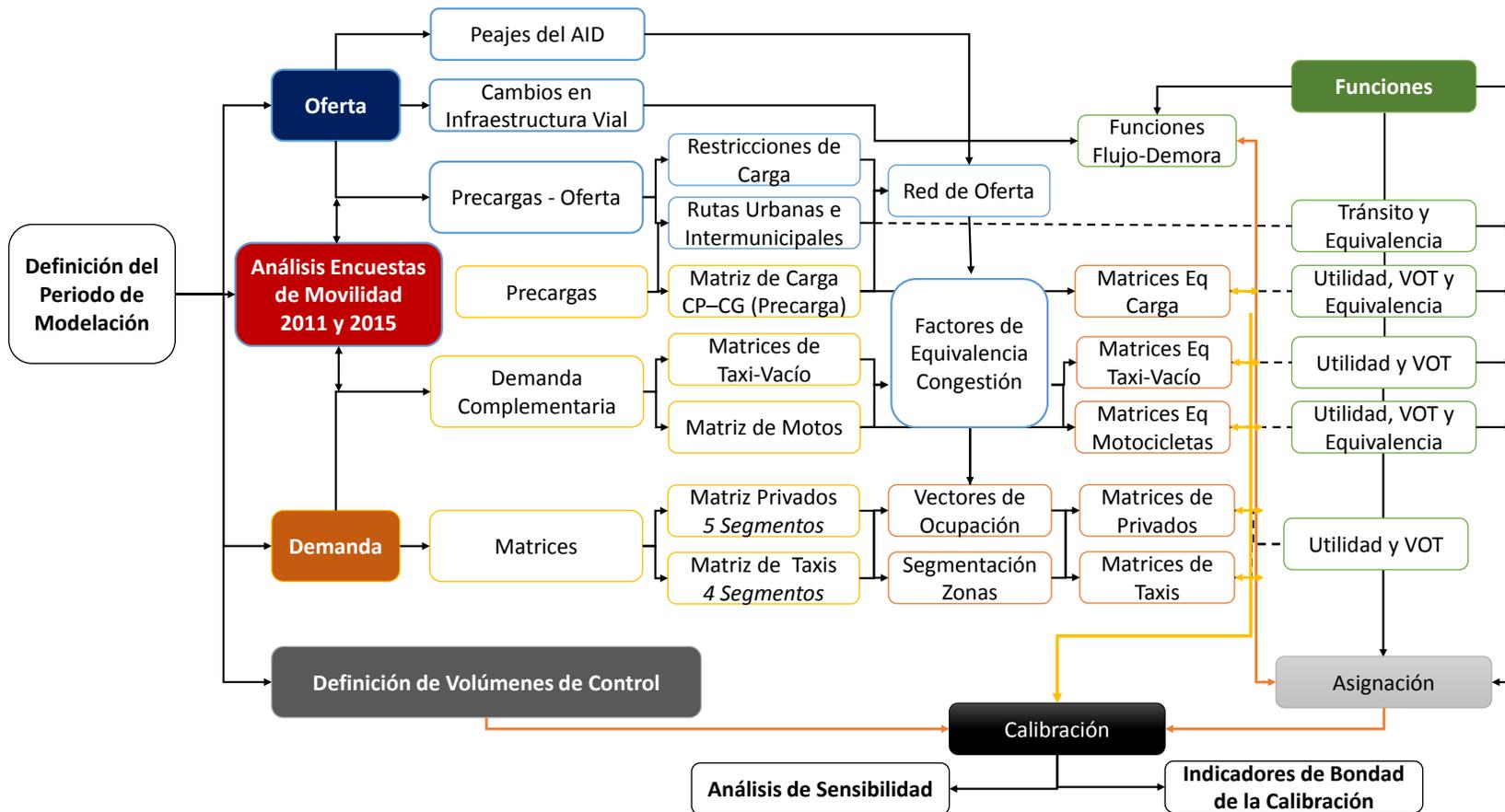
Luego de identificar el periodo pico de la mañana y definir la estructura del modelo de transporte, se procedió a actualizar cada uno de los elementos y atributos que definen la red de oferta considera para la adecuada representación del modelo, concluida esta etapa se procedió a desarrollar la fase de validación y actualización del modelo de demanda, en la cual se trabajaron elementos como la zonificación, la conectividad y en particular se estimaron las matrices semilla o base para la calibración del modelo de transporte privado, definiéndose la necesidad de incorporar segmentos de demanda complementarios que permiten la adecuada representación del sistema. Dentro de la demanda complementaria al vehículo particular se encuentran: taxis, motocicletas, transporte público y camiones. Con el fin de incorporar los efectos que sobre los tiempos de tránsito genera la presencia de vehículos del transporte público, se estimaron los volúmenes de vehículos de este segmento del transporte en cada uno de los arcos de la red de oferta. Teniendo en cuenta la necesidad de representar las demoras generadas en la red por cada una de las tipologías vehiculares consideradas, se definieron los factores de equivalencia vehiculares tomando como referencia los vehículos livianos.

Los factores de equivalencia permitieron obtener las matrices de viajes vehiculares equivalentes a automóviles para cada uno de los segmentos de demanda, mientras que se generó una precarga que representa la condición estática de la oferta del transporte público. Las matrices modales equivalentes se asignaron sobre la oferta haciendo uso del software de modelación Emme 4.0, esto se realizó por medio de algoritmos que representan de manera correcta la metodología definida para la asignación del modelo.

En esta fase se procedió a ajustar las matrices de cada uno de los segmentos de demanda que considera el modelo, este procedimiento se realizó considerando los volúmenes de control en el modelo de transporte. Ajustadas las matrices, se procedió a corroborar la bondad de la calibración alcanzada, mediante la estimación de indicadores de ajuste del modelo comparando volúmenes observados y simulados.

Como actividad final se realizaron análisis de sensibilidad del modelo de transporte ante las siguientes variables: funciones de demora, valor del tiempo y precargas asociadas al transporte público. El detalle metodológico de cada una de las actividades realizadas como parte del estudio se detalla a lo largo del presente capítulo. El resumen de la metodología por medio de la cual se desarrolló la investigación se presenta en la Figura 2-1.

**Figura 2-1:** Metodología General del Estudio.



Fuente: Elaboración propia

## 2.1 Periodo de Modelación

Aun cuando se realizaron análisis de mediante diferentes metodologías que buscan identificar el periodo matutino de mayor actividad, el periodo de modelación se definió como el pico de la mañana que surge como resultado de la encuesta de movilidad realizada en 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). En este contexto el periodo de modelación que se trata en este documento se define entre las 6:00 y las 7:00, el argumento principal es el consolidar una herramienta tenga continuidad en la planeación de la ciudad.

Como parte de la discusión se presentan análisis de 4 metodologías que buscan generar una discusión de cuáles deben ser las consideraciones para definir el periodo pico.

## 2.2 Estructura del Modelo de Asignación

El enfoque del modelo de transporte fue definido de manera integral considerando los aspectos relevantes como: la disponibilidad de datos, la exactitud deseada, el contexto de planeación el estado del arte, los recursos disponibles y el nivel de preparación y habilidad del analista (Ortúzar y Willumsen, 2008). En el contexto anterior, el modelo de asignación desarrollado se define a partir de modelos previos e información disponible, para un nivel de planeación estratégico que busca una adecuada representación de la red primaria de la ciudad, considerando además el grado de formación del investigador.

Se definió representar el sistema de transporte a través de modelo estático, que asume que durante el periodo modelado se mantienen las mismas condiciones de demanda y presupone la existencia de una situación de equilibrio. La decisión está basada en la robustez de los algoritmos de modelación estática, frente a los algoritmos de modelación dinámica de tráfico y aunque este último tiene la capacidad de representar los cambios de la demanda en función del tiempo presenta a menudo problemas de convergencia en redes complejas. (Sharminda y Krishna, 2011).

El modelo de transporte se actualizó en el software Emme 4.0, definido como una herramienta de simulación orientada a la planificación de transporte. Emme proporciona a los modeladores del transporte la flexibilidad y el rendimiento requeridos para la planeación del transporte (INRO, 2014).

Con el fin de establecer metas claras para el desarrollo de la validación y actualización de los elementos del modelo, se definió de manera previa la estructura del modelo de transporte. Se concluyó la necesidad de simular los siguientes segmentos de demanda: automóviles con 5 segmentos asociados al valor del tiempo o el tipo de viaje (urbano o suburbano), taxis ocupados y taxis vacíos, motocicletas, camiones pequeños y camiones grandes. Considerando las precargas derivadas de la operación del transporte público y las tarifas de cobro definidas en las estaciones de peaje.

Las actividades desarrolladas para la consolidación de una red de oferta se definieron a partir de la necesidad de representar adecuadamente cada uno de los modos en el sistema de transporte. En este sentido, los procesos que derivan en la estimación de las matrices semilla actualizadas para el 2015, se definen a partir de las condiciones de información (vehículo particular), modo K (camiones pequeños), H (camiones grandes), modo B (urbano SITP Urbano), modo G (urbano SITP Complementario), modo T (TransMilenio) y modo A (Alimentación).

## **2.3 Actualización del Modelo de Oferta de Transporte Privado**

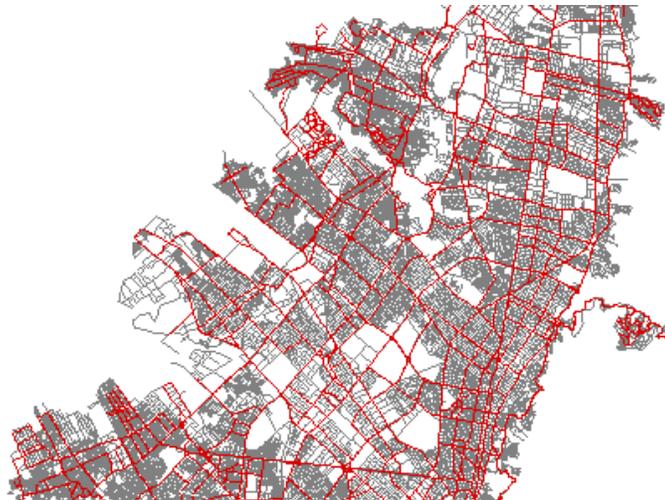
Como parte de la revisión y ajuste del modelo de oferta, se realizó la actualización de la red de modelación definida para el área de influencia. Para este fin, se tuvo como base la red del modelo desarrollado para el proyecto de cargos por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013). La red de transporte de referencia fue validada, complementada y actualizada de acuerdo a las necesidades del nuevo modelo y conforme a los cambios que se han presentado en la infraestructura vial de la ciudad y regulación del sistema.

En este capítulo se resume el método de validación utilizado para actualizar la caracterización de la oferta de transporte, que permitió consolidar una red vial que representa las condiciones operativas del sistema de oferta en el 2015.

**Pertinencia de la Red de Referencia.** Luego de revisar los modos definidos en la red de oferta de referencia y la estructura que considera las tipologías viales, se procedió a definir los arcos que por sus condiciones operativas no presentan una funcionalidad en el modelo. Este análisis se desarrolló mediante el procesamiento de las bases de datos asociadas a la red de modelación mediante análisis geográficos por medio del software TransCad 4.5, Como resultado de la validación de la pertinencia de la red de referencia fue necesario eliminar una cantidad importante de arcos que no hacían parte de la oferta del transporte privado. Considerando que la red de interés se define como la red principal se introducen arcos secundarios que aminoran los errores en la red estudiada (Jansen y Bovy, 1982).

**Actualización de la Red de Transporte.** Considerando la conveniencia del uso de una red simplificada y la estructura de la misma, se analizó la necesidad de incluir nueva red en el modelo, para esta finalidad se realizaron análisis geográficos sobre la red vial detallada de la ciudad que fue suministrada por la Secretaría Distrital de Movilidad, se constató de ésta manera la adecuada representación en el modelo de los corredores que definen la red vial principal la cual representa de manera adecuada la oferta de transporte de un modelo macroscópico, identificándose algunos arcos que se debían incluir bien como complemento a la red de modelación y otros casos en que se debían suprimir algunos

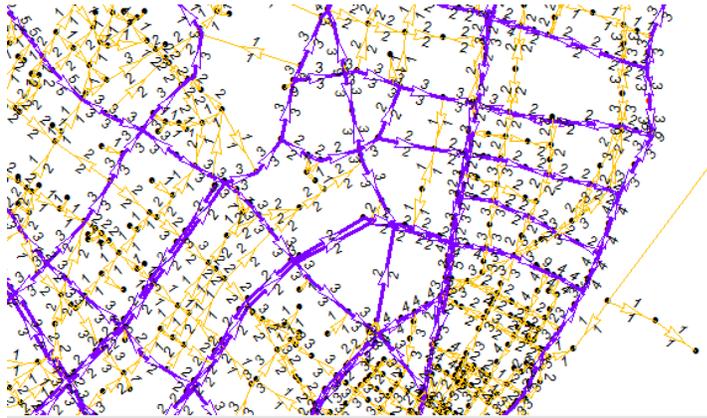
**Figura 2-2:** Uso de la Herramienta TransCad para la Validación de la Red.



*Fuente: Elaboración propia*

**Actualización de Carriles y Direccionalidad:** Definida la red de modelación se procedió a revisar uno a uno los corredores viales en términos de número de carriles y direccionalidad de los flujos permitidos. Para este análisis fue importante el módulo gráfico ofrecido por TransCad4.5 (ver Figura 2-3) facilitando la labor de caracterizar carriles y direccionalidades a partir de las imágenes registradas en Google Earth. Una vez caracterizada la direccionalidad y el número de carriles/sentido para la red de modelación se compararon las bases de datos con respecto a la red de referencia, como siguiente paso se realizó una segunda verificación de la red que presentó diferencia en las comparaciones realizadas, de esta manera se tuvo la mayor certeza de que los cambios que se implementaron representan las condiciones reales de la operación.

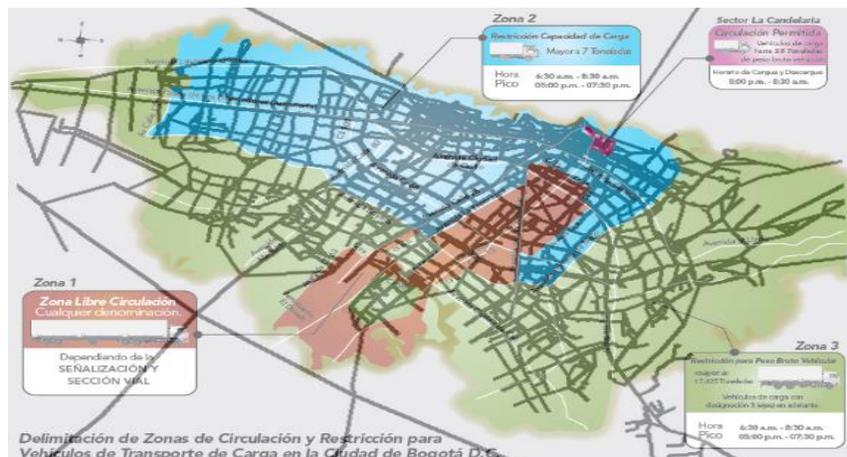
**Figura 2-3:** Proceso de Validación de Carriles y Direccionalidad de la Red.



*Fuente: Elaboración propia*

**Análisis Modal de la Oferta:** Una vez actualizados los carriles se procedió a asignar los modos de transporte habilitados para cada uno de los arcos de la red, para lo anterior se consideró la normatividad vigente que define la Secretaría Distrital de Movilidad (Alcaldía Mayor de Bogotá, Decretos 520, 575 y 690 de 2013), (Alcaldía Mayor de Bogotá, Decreto 540 de 2009), (Alcaldía Mayor de Bogotá, Resolución 003 de 2014). Según lo anterior a cada uno de los arcos de la red de transporte les fue definido el o los modos habilitados durante el periodo de simulación. A manera de ejemplo en la Figura 2-4 se presenta la referencia para habilitar los modos de transporte asociados a camiones.

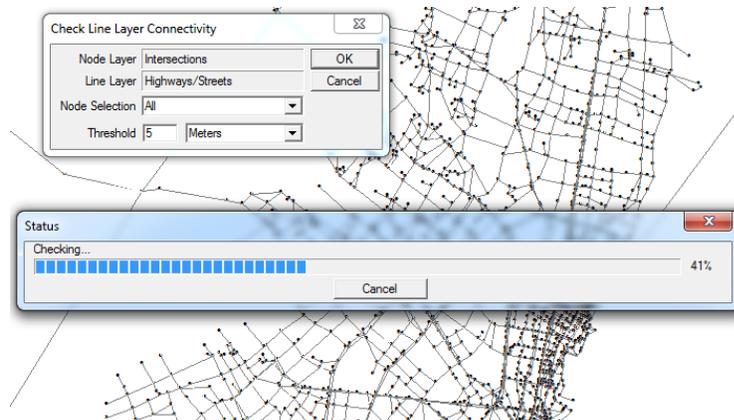
**Figura 2-4:** Asignación de Modos de Transporte K (Camiones Pequeños) y H (Camiones Grandes) - Decreto de Carga 520 de 2013, Alcaldía de Bogotá.



Fuente: Elaboración propia

**Análisis de Conectividad:** Con el fin de validar la conectividad de la red de transporte se usó el software TransCad 4.5, mediante la función denominada “Check Line Layer Connectivity” se identificaron nodos donde potencialmente podrían existir problemas de conectividad de la red de modelación y se revisaron manualmente. La **Figura 2-5** presenta la ejecución del proceso de validación de la conectividad.

**Figura 2-5:** Proceso de Validación de la Conectividad en TransCad.



*Fuente: Elaboración propia*

**Representación de Cobros en Peajes:** Luego de hacer una revisión de las casetas de cobro en área de influencia del modelo de oferta, las casetas se georreferenciaron y asociaron al link que mejor las representa. Se gestionó la información asociada a las tarifas de cobro por categoría y, tráfico por categoría durante el año 2015, esto se realizó para las concesiones nacionales (ANI, 2016) y para las concesiones departamentales (ICCU, 2016). Las tarifas de autos se definieron de manera directa de acuerdo al cobro asociado a la primera categoría, por su parte las tarifas de camiones pequeños y camiones grandes se definieron como el promedio ponderado de las tarifas y el tráfico, sin embargo, en los peajes que presentan competencia directa se mantuvo la jerarquía de los costos. Los peajes incluidos como parte del análisis son: Peaje Andes, Peaje Fusca, Peaje Siberia, Peaje Río Bogotá, Peaje Corzo, Peaje La Tebaida, Peaje Mondoñedo, Peaje Boquerón y Peaje Patios. La representación de la red de peajes realizó con el fin de mejorar los modelos de elección de ruta, en tanto atributos de ruta como peajes y consumo de combustible han sido considerados como importantes (Wootton et al., 1981), de tal manera que el tiempo y la distancia explican aproximadamente el 70% de las rutas realmente utilizadas.

**Implementación de Cambios en el Modelo de Emme:** Los cambios que surgieron en cada una de las etapas y procesos que permitieron la validación y actualización de la red de transporte fueron implementados en el escenario base del modelo de transporte que se estructuró en Emme 4.0, lo anterior se logró mediante archivos de texto definidos de acuerdo con los requerimientos del software de modelación. Los resultados obtenidos mediante la ejecución de cada una las actividades descritas en el presente capítulo son presentados en el apéndice 3.1.

## 2.4 Actualización del Modelo de Demanda

La actualización del modelo de demanda buscó mejorar la representación de la misma en el modelo de transporte y obtener matrices semilla o iniciales preajustadas a la condición observada en el año 2015, la metodología definida parte de la validación de Zonas de Análisis de Tránsito (ZATs), el ajuste en la conectividad de los centroides, los análisis de consistencia realizados para el valor subjetivo del tiempo (VOT) y, en particular los procedimientos para la actualización de las matrices semilla, se presentan a continuación el detalle técnico de cada una estas actividades.

### 2.4.1 Zonificación y Conectividad

Considerando la estructura de la información de origen – destino tomada como base para el desarrollo del modelo de transporte, no se consideraron cambios en el diseño de las ZATs del modelo. Bajo este contexto, la validación de la zonificación realizada consistió en verificar que el sistema de zonificación usado en el network de referencia de cargos por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013) fuera el mismo en el que se codificaron las matrices tomadas del modelo de 2011.

Mediante el uso de TransCad4.5 y sobre el archivo geográfico de ZATs definido para el modelo de 2011, se cargaron los nodos que representan los centroides del modelo de cargos por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013), se diligenció en la base de datos de nodos la ZAT geográfica en la que cada nodo está definido, lo anterior se logró mediante la función “TAG”. Con la base anterior se identificaron los nodos que no hacían correspondencia con la ZAT, los cuales aunque no representaban errores se ajustaron posteriormente de manera manual.

La validación de la conectividad se desarrolló bajo la consideración que estos arcos (conectores) deben representar las condiciones de accesibilidad típicas de cada una de las zonas, en este sentido los conectores deben concluir en los puntos de la red donde se presenta la interacción oferta-demanda. El proceso aprovechó la facilidad de interacción gráfica que ofrece TransCad para revisar uno a uno los conectores definidos en la red de transporte, como resultado de la revisión se eliminaron o adicionaron nuevos conectores.

Otra actividad importante correspondió a la depuración de conectores, este proceso fue necesario teniendo en cuenta la depuración de oferta realizada. Se identificaron una cantidad importante de conectores asociados a la red de transporte, que no hacían parte del modelo.

Como actividad final del proceso, se llevó a cabo un chequeo de la conectividad en la red de conectores, este se realizó con la misma metodología definida para la revisión de la conectividad de la red de oferta. Finalizado este proceso se implementaron los cambios en el escenario de modelación definido en Emme 4.0.

### **2.4.2 Actualización de Matrices Semilla**

Las matrices base para el modelo de transporte se definieron mediante información secundaria asociada a modelos de transporte privados que ha desarrollado el Distrito, las matrices de referencia para los modos vehículo particular y motocicleta, fueron tomadas del modelo de transporte desarrollado como parte de la encuesta de movilidad del año 2011 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2011), por su parte las matrices que definen los modos: taxis llenos, taxis vacíos, camiones pequeños y camiones grandes, fueron obtenidas del modelo de Cargos por Congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013).

Inicialmente los estudios de planeación de transporte dependían de información de patrones de viaje obtenidos en campo en un momento fijo del tiempo (sección transversal), sin embargo, muchos autores consideran que para construir modelos predictivos más fiables se deben usar datos longitudinales o series temporales (Ortúzar y Willumsen, 2008). Lo anterior justifica el uso y la actualización de las matrices existentes.

Con el fin de representar adecuadamente la demora, las matrices asignadas corresponden a viajes vehiculares equivalentes a vehículos livianos. A lo largo del presente capítulo se presenta la metodología que permitió la obtención de las matrices semilla.

#### **2.4.2.1 Matrices de Vehículo Particular**

La matriz base que se tomó como partida para la estimación de las matrices semilla del segmento definido por los vehículos particulares, corresponde la matriz de viajes de personas. Si bien las matrices se calibran para los flujos vehiculares asociados a cada categoría, las matrices asignadas corresponden a viajes origen – destino de vehículos equivalentes por lo que es importante llevar las matrices de personas a matrices de viajes, lo anterior se logra por medio de un vector de ocupación que se define para cada una de las ZATs y es aplicado sobre la matriz considerando la zona de origen del viaje.

Una vez definidas las matrices vehiculares, la matriz fue segmentada considerando las diferencias en el valor del tiempo en dos grupos, el primero corresponde a viajes suburbanos (con origen y/o destino fuera de Bogotá), mientras que el segundo grupo consolida los viajes urbanos (realizados al interior de la capital), la matriz de viajes urbanos fue a su vez dividida en 4 categorías a partir del estrato socioeconómico del viajero, bajo el supuesto que la totalidad de viajes en la hora pico son basados en el hogar y definido el estrato socioeconómico representativo para cada una de las zonas, se realizó la segmentación considerando el estrato de la zona de origen del viaje.

A continuación, se describen las actividades mediante las cuales se desarrolló la metodología que permitió obtener las matrices semilla del modelo.

**Validación y Ajuste del Vector de Ocupación:** Partiendo del vector de ocupación del modelo de cargos por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013), por medio del procesamiento de bases de datos, este vector fue cargado asociándolo al archivo geográfico de ZATs mediante el uso de TransCad4.5. Se identificaron las ZATs en las cuales no estaba definido el vector y se completaron los valores por medio de la asociación de una o varias zonas aledañas que tenían definido el mismo grupo socioeconómico.

**Estimación de las Matrices Vehiculares:** Mediante el uso del módulo 3.0 del software Emme 4.0 (Editor de matrices), se realizó la división de las matrices de viajes de personas en el vector de ocupación definido para cada ZAT, lo anterior permitió cuantificar a partir de la matriz de viajes vehiculares. Este proceso se programó como una de las macros usadas por la asignación del modelo (Ver capítulo 3.4).

**Segmentación de las Matrices Vehiculares:** Haciendo uso del editor de matrices de Emme 4.0, se realizó la segmentación de las matrices en un primer paso, definiéndose las matrices urbana y suburbana de viajes en vehículos y, posteriormente se dividió la matriz urbana considerando el estrato socioeconómico de la zona de origen del viaje de la siguiente manera: autos urbanos estrato 1-2, estrato 3, estrato 4, estrato 5-6. En total se definieron 5 segmentos de la matriz de viajes de vehículo privado.

#### **2.4.2.2 Matrices de Transporte Individual**

La segmentación del transporte individual define taxis ocupados y taxis vacíos, la semilla de taxis ocupados parte de una matriz de viajes del modelo de cobros por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013), esta matriz de viajes define la matriz vehicular por medio del indicador de ocupación medio del modo; por su parte la matriz de taxis vacíos que se toma como semilla está definida en viajes vehiculares. La matriz de taxis ocupados se definió a nivel de estrato con la misma segmentación usada para automóviles (estrato 1-2, estrato 3, estrato 4, estrato 5-6).

**La actualización de la tasa de ocupación media de los taxis con pasajeros**, se realizó mediante el procesamiento de las bases de datos que consolidan el estudio de Frecuencia y Ocupación Visual (FOV) desarrollado por como parte del estudio de monitoreo de 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015), el análisis realizado consideró la información de días hábiles típicos en el periodo modelado, se procesaron más de 120 aforos de acceso distribuidos de tal forma que permiten cuantificar un valor representativo del sistema (ver Figura 2-6).

**Figura 2-6:** Estaciones de FOV para Actualización de la Tasa de Ocupación de Taxis.



*Fuente: Elaboración propia*

Una vez actualizada la tasa de ocupación media de los taxis en servicio durante el periodo pico, se hizo la **estimación de la matriz de viajes vehiculares de taxis ocupados**, este procedimiento se realizó mediante el editor de matrices de Emme y fue programado como parte de la macro de asignación del modelo de transporte (Ver capítulo 3.4). Definidas la matriz vehicular de taxi ocupado se desarrolló la **segmentación de la matriz para las cuatro categorías** definidas, con la misma metodología que se expuso para la segmentación de automóviles.

El otro segmento definido para el análisis de transporte individual, corresponde a los taxis sin pasajeros que se movilizan sobre la red de transporte, denominados en el presente

documento “taxis vacíos”, la matriz definida para este segmento de demanda no fue actualizada dado que no fue posible lograr información adecuada para tal fin, siendo relevante destacar que en el periodo comprendido entre 2011 y 2015 tuvo un auge importante el uso de aplicaciones móviles que pueden incidir en la reducción de kilómetros en vacío para el transporte individual.

### **2.4.2.3 Matriz de Motocicletas**

De acuerdo con los resultados de la encuesta de movilidad 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015), la motocicleta fue el modo de transporte con mayor cambio en su tasa de uso, de ésta manera mientras en la encuesta de movilidad de 2011 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2011) se registraron un total de 410,613 viajes diarios en motocicleta para la zona de estudio, esta cifra en el año 2015 se estimó en 819,135. Los análisis de flujos de motocicletas en el periodo pico permitió la **estimación de un factor de actualización** de 1.32, el cual fue aplicado sobre la matriz de referencia del modelo desarrollado en 2011.

El factor de ajuste que permitió la **actualización de la matriz de motocicletas**, se definió por medio del análisis de aforos durante el periodo pico de la mañana de un día hábil típico.

### **2.4.2.4 Matrices de Transporte de Carga**

Las matrices de referencia para el transporte de carga tienen como fuente el modelo de Cargos por Congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013), su segmentación considera de manera independiente los camiones pequeños y camiones grandes. La **actualización de las matrices semilla de carga** se realizó por medio de una preasignación del modelo efectuada sobre el escenario de oferta definitivo y sobre los conectores actualizados, la actualización consideró la eliminación de los viajes que no se asignaban en la red.

### **2.4.3 Valores Subjetivos del Tiempo**

Tradicionalmente, los estudios de modelación de la demanda de transporte, se han basado en información relacionada con las elecciones y decisiones declaradas por los usuarios, es decir, en información de preferencias. El valor del tiempo se tomó de estudios de referencia recientes y no fue actualizado este valor considerando la dificultad de la información requerida, en tanto: Para actualizar los valores del tiempo, debe utilizarse

información acerca de los ingresos reales, existe una relación clara entre los ingresos y el valor de tiempo que no es directamente proporcional, los valores del tiempo varían dependiendo de los niveles de congestión (Department of Transport UK, 1987).

Dada la imposibilidad de realizar estudios de campo de este tipo, se tomaron como referencia los valores del tiempo (VOT) definidos para el modelo de cargos por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013), estos son:

- Usuarios del automóvil estrato 1 y 2 : 92 \$/min.
- Usuarios del automóvil estrato 3: 79 \$/min.
- Usuarios del automóvil estrato 4: 95 \$/min.
- Usuarios del automóvil estrato 5 y 6: 105 \$/min.
- Camiones Pequeños: 149 \$/min.
- Camiones Grandes: 222 \$/min.
- Taxis Ocupados: Estrato de la ZAT de origen.
- Taxis Vacíos: Estrato 3.
- Motocicletas: Estrato 4.

Los valores del tiempo definidos para los automovilistas presentan una relación directamente proporcional al estrato, a excepción del VOT del estrato 1-2, considerando la correlación descrita el valor del tiempo y el nivel de ingresos se definió necesario **realizar la estimación de un nuevo VOT para los automovilistas de estrato 1 y 2**. Para lo anterior se analizaron los valores del tiempo definidos en el “Estudio de Pre-inversión para la Estimación y Caracterización de la Demanda de la Red Metro Ligero de la Ciudad de Bogotá” (Steer Davies Gleave, 2014), en el que se definieron los siguientes valores de VOT para el transporte público: estrato 1-2 \$25.5/minuto, estrato 3 \$36/minuto y estrato 3-4-5 \$52/minuto. Según los datos anteriores el VOT del estrato 1-2 representa el 71% del VOT del estrato 3, al aplicar este factor para en los VOT de transporte privado de estrato 3 (\$79/min), se estimó un valor del tiempo para los usuarios del estrato 1-2 de \$56/min.

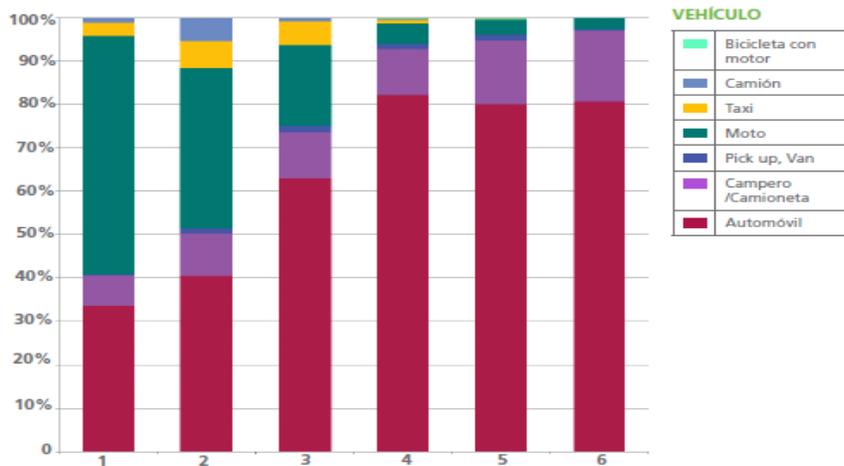
Lo anterior es consistente además con el costo medio diario que invierten los usuarios de cada estrato para desarrollar sus viajes, en este sentido mientras los viajeros de estrato 1 invierten en promedio \$3,795, los viajeros de estrato 2 invierten \$4,037, los de estrato 3, 4, 5 y 6 invierten \$6,313, \$10,311, \$12,608 y \$15,738 respectivamente. Al estimar el costo ponderado para el estrato 1 y 2 (\$3,922) y relacionarlo con el costo definido para el estrato 3, se estimó que el estrato 1 y 2 invierte el 62% de lo invertido por el estrato 3.

Para la **definición del valor del tiempo asociado a los usuarios con viajes suburbanos**, se tomó como referencia el estudio denominado “Consultoría para el Pronóstico de Demanda e Ingresos para el Grupo de Concesiones Viales del Occidente de Bogotá: Sabana de Occidente, CCFC S.A. y Panamericana” el cual fue desarrollado por Conarcon S.A.S. en el año 2012 (Conarcon, 2012), estimándose valores del tiempo por motivo de viaje así: trabajo \$136/min, recreación \$134/min y otros motivos \$148/min, ponderando los VOTs con los viajes asociados a cada motivo se estimó un VOT de \$137/min, actualizando este valor a 2015 por medio del IPC se estimó un VOT para el segmento de automóviles de \$148/min. Considerando la distribución poblacional en la Sabana, se considera este valor del tiempo representativo para los viajes suburbanos.

Se consideró prudente mantener los VOT por estrato de automóviles para los usuarios del taxi ocupado, en tanto no se contó con una estimación certera de los valores del tiempo de los usuarios que hacen uso de los modos de transporte.

No se contó con información de referencia para la estimación del VOT de los taxis que transitan por la red sin pasajeros a bordo (taxis vacíos), sin embargo, teniendo en cuenta la operación de este segmento de demanda es claro que su apreciación del tiempo debe ser consistente con el nivel de socioeconómico de los conductores, en el contexto anterior esta categoría fue asignada con el VOT que define el estrato 3. Lo anterior es consistente con el estrato socioeconómico de los hogares donde se concentra la flota de vehículos de transporte individual (Figura 2-7).

**Figura 2-7:** Distribución Porcentual del Tipo de Vehículo por Estrato.



*Fuente: Tomada de Informe de indicadores Encuesta de Movilidad de Bogotá 2011 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2011).*

Para el segmento de motocicletas no fue necesario suponer valores del tiempo, teniendo en cuenta que no se presentan cobros asociados a esta tipología vehicular. Las demás categorías fueron tomadas a partir de las referencias que define el modelo de cargos por congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013), de esta manera los VOTs definidos para el modelo fueron los siguientes:

- Usuarios del automóvil estrato 1 y 2 : 56 \$/min.
- Usuarios del automóvil estrato 3: 79 \$/min.
- Usuarios del automóvil estrato 4: 95 \$/min.
- Usuarios del automóvil estrato 5 y 6: 105 \$/min.
- Usuarios del automóvil Intermunicipales: 148 \$/min.
- Camiones Pequeños: 149 \$/min.
- Camiones Grandes: 222 \$/min.
- Taxis Ocupados: VOT automóvil (ZAT de origen).
- Taxis Vacíos: Estrato 3.
- Motocicletas: Sin VOT.

## 2.5 Actualización del Modelo de Demanda

Teniendo en cuenta el precepto básico de las unidades en las que se expresa la capacidad vial, correspondiente a vehículos/hora/carril y, que los vehículos de la expresión se asocian a vehículos ligeros, surge una reflexión importante acerca de la equivalencia (cuantificada en factores) de los demás tipos de vehículo que transitan en una vía con tráfico mixto en condiciones de flujo libre y congestión.

El efecto de los vehículos pesados (camiones y buses) en la capacidad vial se puede atribuir especialmente a dos factores principales: consumen un mayor espacio respecto de los vehículos livianos y sus características operativas de aceleración, desaceleración, maniobrabilidad etc., en términos generales son menos rápidas y fluidas respecto de las que presentan los vehículos livianos.

Con el fin de **estimar los factores de equivalencia de los vehículos pesados** usados durante la asignación del modelo vehicular de la ciudad de Bogotá. Se ha usado el Highway Capacity Manual 2000 HCM (TRB, 2000), que ha estimado para operaciones no saturadas los factores de equivalencia, en tanto para la definición de equivalencias bajo condiciones de saturación fue importante el estudio “Developing Passenger Car Equivalency Factors for Heavy Vehicles during Congestion” (Ahme et al., 2005), este último se basa en la teoría de flujo de descarga de colas, que se considera la situación predominante cuando empieza la congestión y, utiliza programaciones no lineales para la estimación de los factores de equivalencia de vehículos pesados en condiciones de congestión.

Ambos estudios definen como variables básicas que se asocian a cada segmento de estudio a la: pendiente de vía (%), longitud de la pendiente (Km) y porcentaje de vehículos pesados (%). Para la estimación de los factores de equivalencia usados en el modelo, se procedió a realizar una segmentación de la red vial de la red de Bogotá, en la que para cada tramo de estudio se asumió una pendiente promedio, se conocía su longitud y, se estimó una composición vehicular calculada a partir del procesamiento de los aforos de las Estaciones de Monitoreo del año 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015).

Enseguida, para cada tramo de estudio se definió la condición de saturación (no saturadas o de congestión) de acuerdo con la definición del Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte, (Secretaría de Tránsito y Transporte, 2005) en el que se cita que una vía se considera en congestión cuando el volumen de demanda de tránsito en uno o más puntos de una vía excede el volumen máximo que puede pasar por ellos”.

Luego de establecer la condición de congestión de cada tramo analizado, se definió para cada tipo de vehículo estudiado el factor de equivalencia, obteniéndose el factor final como el promedio de los factores de equivalencia individuales (combinación tramo – tipo de vehículo) ponderado por la longitud de cada tramo analizado, realizándose para las categorías de transporte público un ajuste final sobre la data de tal forma que representara la jerarquía de frecuencia de paradas. Los resultados de la metodología definieron los factores de equivalencia usados para la asignación de la siguiente manera:

▪ Camiones Grandes	2.5
▪ Camiones Pequeños	2.0
▪ Biarticulado	3.5
▪ Bus Articulado	3.0
▪ Bus Padrón Alimentador	2.5
▪ Bus Padrón Pretroncal	2.0
▪ Bus SITP Complementario	2.5
▪ Bus SITP Urbano	2.0
▪ Bus Intermunicipal	2.3
▪ Microbús Intermunicipal	1.8
▪ Motocicletas	0.3

## 2.6 Precargas del Transporte Público

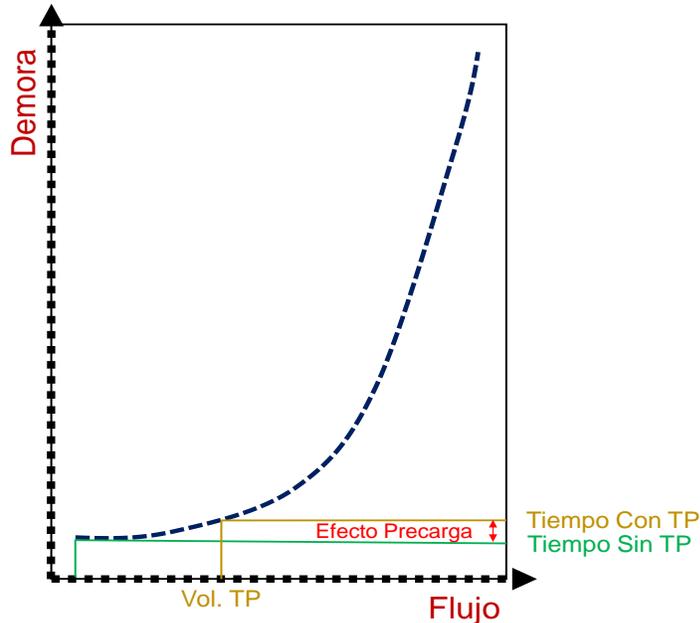
Los flujos existentes en una red de transporte generan congestión en la misma, generándose tiempos de tránsito sobre la infraestructura directamente proporcionales a los volúmenes vehiculares que hacen uso simultáneamente de la misma. Considerando el efecto mencionado se consideró importante involucrar en el modelo las demoras en la red generadas por la operación del transporte público.

Considerando que la oferta de transporte público (servicios y frecuencias) se puede ver en un modelo estático como independiente a la del transporte privado y el hecho de que la operación de transporte público presenta rutas definidas sobre un mismo recorrido; se puede afirmar que existe una precarga o un flujo inicial sobre cada arco de la red sobre el cual existan rutas de transporte público, dicho flujo genera unas condiciones iniciales de saturación a la que se le asocia un aumento de los tiempos de tránsito que tienen los automóviles sobre el arco.

Según lo anterior, si pensamos en un automóvil que transita sobre un arco como único usuario con un tiempo de tránsito  $t_0$  y en el automóvil que transita sobre el mismo arco compartiendo este con vehículos del transporte público, es claro el hecho de que la segunda condición presenta un tiempo de tránsito mayor que  $t_0$ .

La condición y el efecto en la demora generado por el transporte público se pueden apreciar en la siguiente figura.

**Figura 2-8:** Distribución Porcentual del Tipo de Vehículo por Estrato.



*Fuente: Elaboración propia.*

Con el objetivo de representar esta condición en el modelo de asignación fue necesario generar las rutas sobre la red modelación y de manera complementaria generar un diseño operacional de la oferta de transporte público durante el periodo modelado. En este punto se abordaron de manera independiente las rutas urbanas representadas por los sistemas SITP – TransMilenio y las rutas intermunicipales. Precargas Rutas Urbanas.

### 2.6.1 Precargas Rutas Urbanas

Las precargas de este segmento, se determinaron sobre cada uno de los arcos que conforman la red vial como el producto de la frecuencia horaria y el factor de equivalencia definido para los vehículos que transitan sobre el arco analizado

Conocidos los itinerarios y tipologías vehiculares por medio de información secundaria, la frecuencia se definió por medio de la estimación de intervalos establecidos para suplir la demanda del sistema, esta se definió por medio de la simulación del sistema de transporte público. En los siguientes párrafos se detalla el desarrollo de cada una de las actividades que integralmente conforman la metodología para la estimación de las precargas del transporte público.

La **actualización de la oferta de rutas urbanas** se desarrolló a partir de información suministrada por TransMilenio S.A., en la cual se especificaba además del itinerario, el tipo de vehículo para cada servicio. Teniendo en cuenta que para 2015 se presentó una oferta de transporte público dinámica como consecuencia de la implementación del SITP, las precargas del transporte público se estimaron a partir del diseño de rutas del SITP que en este momento define las metas de implementación del sistema. Es importante hacer claridad acerca de que las rutas digitalizadas no corresponden al total de las rutas que prestan el servicio en el área de estudio, sino únicamente al subconjunto que actualmente son ofertadas durante el periodo pico de la mañana. La digitalización de las rutas se desarrolló mediante TransCad 4.5 y por posteriormente la oferta fue importada al modelo de transporte público definido en Emme 4.0.

Usando el modelo de transporte público suministrado por TransMilenio S.A., se realizó la **asignación de la demanda** para la hora pico de un día hábil típico. Es importante resaltar que la estructura del modelo usado representa el esquema tarifario del transporte público

de la ciudad y contiene las matrices de demanda calibradas a nivel de corredor para el año 2014. La asignación se realizó sin restricción de capacidad de las líneas con un intervalo de paso de 6,5 minutos para el sistema, a partir de los resultados se desarrolló el ajuste de los intervalos de paso con el propósito de calcular la frecuencia que requiere cada servicio para suplir la demanda del sistema. La estimación de los intervalos se realizó de acuerdo a la metodología definida en el texto “Transporte Público: Planeación, Diseño, Operación y Administración” (Molinero y Sánchez, 2005).

La última actividad ejecutada para estimar la precarga del transporte público, consistió en determinar las precargas en la red, cada una de las rutas tiene asociada una frecuencia horaria y una tipología vehicular, como el producto de estas dos variables, se determinó en vehículos livianos equivalentes el flujo que sobre la red representa las demoras asociadas a la operación del transporte público.

En el capítulo 3.3, se presentan los resultados de cada una de las actividades que constituyen la metodología para la estimación de precargas asociadas al transporte público.

### **2.6.2 Precargas Rutas Intermunicipales**

La definición de las precargas relacionadas al transporte intermunicipal, se realizó por medio del desarrollo de estudios de frecuencias para el transporte intermunicipales, los estudios se efectuaron en el periodo comprendido entre las 5:45 y las 7:15 para días hábiles típicos. La ubicación de los estudios se estableció en sitios estratégicos de la ciudad desde el punto de vista de la operación del transporte público intermunicipal, los observadores registraron información concerniente a: tipo de vehículo, ruta, día, fecha y hora de paso, sentido de circulación y empresa.

En la Figura 2-9 se presenta registro fotográfico de los estudios de campo, si bien el estudio no sigue el detalle de lo definido por el manual de planeación de Bogotá (Secretaría de Tránsito y Transporte, 2005), recopila de manera diligente la información requerida.

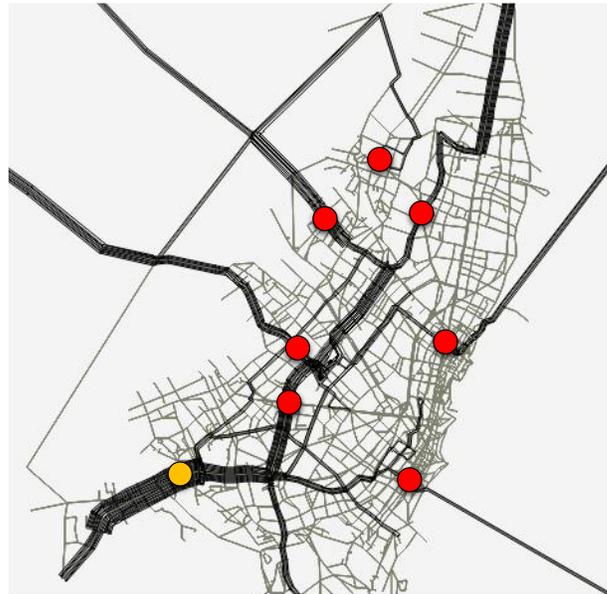
**Figura 2-9:** Trabajo de Campo - Estudio de Frecuencia de Rutas



*Fuente: Elaboración propia.*

La digitalización de las rutas se realizó a partir de la normatividad definida por la alcaldía de Bogotá, tanto para las rutas de Soacha (Alcaldía Mayor de Bogotá, Resolución 003 de 2014) como para otras rutas intermunicipales (Alcaldía Mayor de Bogotá, Decreto 540 de 2009), una vez conocido el trazado de las rutas se definió la ubicación de los puntos, que buscó minimizar la campaña. En total se desarrollaron 7 estaciones distribuidas en la ciudad de acuerdo con lo presentado en la Figura 2-10.

**Figura 2-10:** Localización Estudios de Frecuencia de Rutas Intermunicipales.



*Fuente: Elaboración propia.*

Luego del proceso de **captura, depuración y procesamiento de la información**, se lograron estimar las frecuencias para cada una de las rutas tipo que operan en el sistema intermunicipal, asignando a cada una la tipología vehicular y la frecuencia de paso durante el periodo pico.

## 2.7 Método de Asignación

Nguyen (1977) introdujo por primera vez el enfoque basado en el equilibrio considerando efectos de congestión. El modelo de asignación desarrollado considera la congestión que se deriva de la interacción de los flujos sobre la red, el modelo desarrollado se base en el equilibrio de Wardrop como se explica más adelante.

En la simulación de la conducta de los viajeros se debe determinar la ruta que estos escogen para alcanzar sus destinos. La asignación del tráfico, indica la cantidad de vehículos que viajan en cada uno de los segmentos de la red. Para realizar la asignación, el modelo escoge el mejor "camino" por la red vial para cada par de viaje, determinando el menor costo entre zonas. La malla vial sobre la que se seleccionan los mejores caminos, tiene en cuenta las capacidades y la velocidad verdaderas, reflejando así el grado de la congestión.

Para la calibración al año base del modelo de viajes vehiculares, se empleó el método de asignación por equilibrio con costo generalizado. El costo generalizado de viaje para el escenario base de calibración, está conformado por: los tiempos de viaje y el costo de pago de peaje. Para transformar la cuota de peaje a unidades de tiempo, minutos, se empleó el inverso del valor del tiempo (VOT), el cual se definió en el capítulo 2.4.3.

Durante el proceso de asignación de viajes por equilibrio, las velocidades de los enlaces se ajustaron según la capacidad y el volumen asignado a cada segmento, lo que tiene como resultado nuevos tiempos de viaje. Estos nuevos tiempos, se utilizan en un proceso cíclico para hacer una nueva distribución y asignación de viajes. El proceso se repite hasta que los tiempos de viaje alcanzan un punto de equilibrio en el que no hay posibilidad de mejorar los mismos, sin degradar los costos de viaje en otras partes de la red. La relación entre la velocidad y la congestión (proporción volumen/capacidad), es definida por la función de demora.

La condición de equilibrio está basada en los principios de Wardrop, según (Ortúzar y Willumsen, 2011), este principio se puede enunciar de la siguiente manera.

“Bajo condiciones de equilibrio, el tráfico se distribuye en las redes congestionadas de modo tal que ningún viajero puede reducir su propio coste de viaje cambiando el recorrido.” De esta manera si los viajeros perciben los costos de la misma forma, el equilibrio de Wardrop se puede enunciar de la siguiente manera:

“Bajo condiciones de equilibrio, el tráfico se distribuye en las redes congestionadas de modo tal que todos los recorridos utilizados entre un par O-D tiene el mismo y mínimo coste mientras todos los recorridos no utilizados tienen costes más altos o iguales.”

Lo anterior implica los siguientes supuestos: primero los usuarios conocen todos los caminos que llevan a su destino y el costo de cada camino, segundo el viaje es visto como una desutilidad, por lo cual los usuarios quieren minimizar su costo generalizado (tiempo y tarifa) y tercero, se llega al equilibrio cuando los usuarios de cada par origen-destino no pueden disminuir más su costo de viaje.

La preferencia con relación a los atributos que intervienen en la decisión de las rutas de transporte elegidas por los usuarios del sistema, es medida en la etapa de asignación a través de la función de costo generalizado. Como ya se mencionó, para este estudio en particular se tomaron en cuenta los componentes demora y tarifa de peajes, combinándose bajo la siguiente estructura de costo.

**Ecuación 2-1** Costo Generalizado de Viaje

$$CGi = CDi + CPI$$

*Fuente: Elaboración propia.*

*Donde:*

*CGi: Costo generalizado de la opción i.*

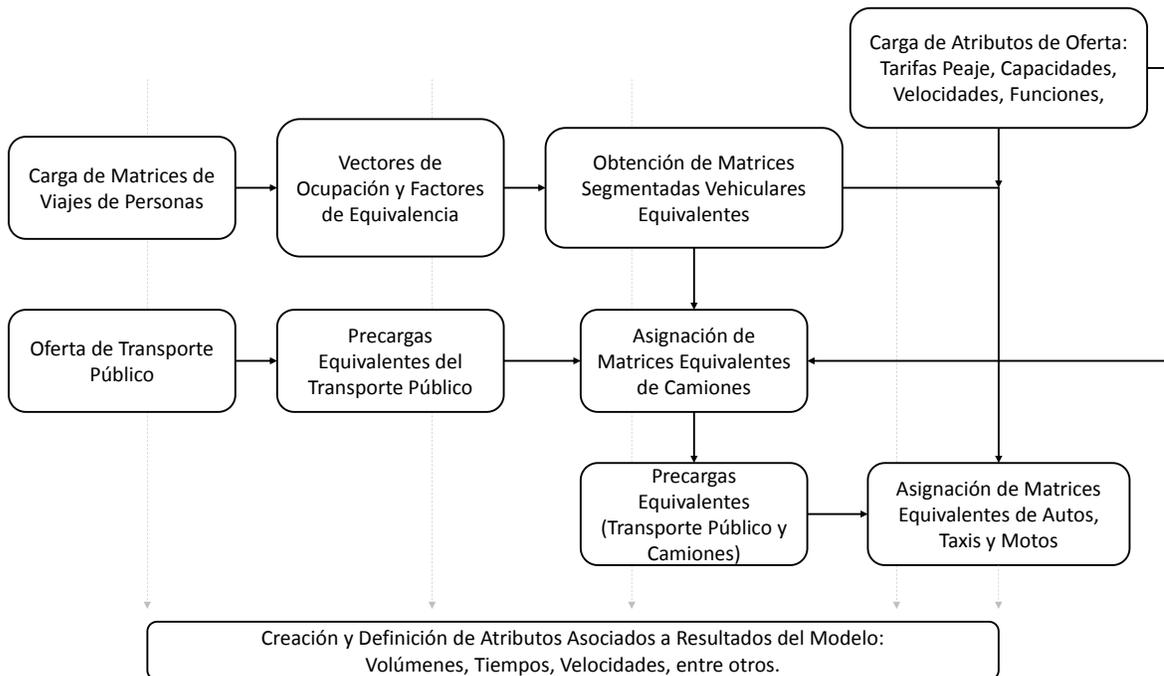
*CDi: Costo por concepto de demora de la opción i.*

*CPI: Costo por concepto de peaje de la opción i.*

Definida la metodología teórica de la asignación realizada y la manera en que se implementa en Emme4.0, se procedió a estructurar las macros de asignación las cuales se definieron bajo una secuencia lógica de la misma: el modelo inicia mediante la definición de las matrices de viajes unipersonales, las cuales posteriormente se convirtieron a matrices de viajes vehiculares equivalentes a autos, segmentando en las categorías ya descritas, luego de cargar los atributos de la red de oferta que inciden en la modelación, se estimó la precarga del transporte público para asignar la demanda equivalente de camiones, cuyos resultados en conjunto con la precarga del transporte público se convierten en base para la simulación de las 11 matrices restantes (5 de vehículo privado, 5 de taxis y 1 de motocicletas).

La Figura 2-11 presenta el diagrama general de flujo del modelo de transporte, es importante resaltar la transversalidad a todos los procesos donde se guardan atributos importantes como volúmenes, tiempos, velocidades, etc.

**Figura 2-11:** Diagrama General del Modelo de Asignación.



*Fuente: Elaboración propia.*

Las macros de asignación del modelo de transporte se estructuraron de tal manera que guardan secuencia lógica en cada una de sus líneas y en la codificación de las variables de entrada y salida. Tanto la macro general de la asignación como cada una de las macros que se usan, hacen parte del anexo magnético entregado como parte del presente trabajo.

## 2.8 Calibración del Modelo de Transporte

Considerando las dificultades para recopilar información primaria de origen – destino, se hizo uso de un método de bajo costo que permite la estimación de las matrices actuales. Los aforos pueden contemplarse como el resultado de combinar una matriz de viaje y unas pautas de elección de ruta. Como tales, ofrecen información directa sobre los pares que usan los pares aforados. La estimación de matrices a partir de aforos de tráfico han sido utilizadas como herramientas en la construcción de modelos durante muchos años,

produciéndose matrices consistentes con la información disponible (Ortúzar y Willumsen, 2008).

La calibración del modelo consistió en reproducir los volúmenes vehiculares observados en campo y los tiempos de recorrido recabados para los principales corredores, en cada una de las rutas definidas para este fin. Durante el proceso de calibración, se ubicaron como control los puntos en los cuales se recopilaron datos de conteos, con el fin de garantizar la reproducción de los volúmenes observados en el periodo de simulación.

El desarrollo de la calibración fue un proceso iterativo sobre el principio de ensayo-error, comparando las cifras arrojadas por el modelo con las obtenidas en los puntos en los cuales se tuvieron conteos. De la misma manera, se efectuó el proceso de representación de los tiempos de recorrido observados sobre los principales corredores de la red vial.

Se realizó la asignación para el periodo de modelación de las matrices resultantes, de la combinación de la demanda estimada para el resto de la ciudad con la matriz equivalente de las encuestas en campo.

Es importante aclarar, que el proceso de calibración mencionado se siguió hasta lograr el máximo nivel de representación de los volúmenes observados mediante el análisis de estrategias de caminos de viaje lógicos para los diferentes pares Origen-Destino (OD). La etapa de verificación del modelo y sus soluciones, fue desarrollada con el fin de verificar el rendimiento, la razonabilidad y sensibilidad del modelo (Ortúzar y Willumsen, 2008).

En los puntos de la red en los que se tuvo déficit o superávit de viajes respecto de los aforos observados por fuera de la banda de tolerancia de la dispersión, se aplicó como acción final del proceso, la corrección o calibración de la demanda por medio de la técnica de conteos que se describe enseguida.

### **2.8.1 Volúmenes de Calibración**

Estructurado el modelo de transporte, se definieron los volúmenes de control en arcos estratégicos de la ciudad, para cada uno de los segmentos de demanda. Esta actividad se realizó a partir del procesamiento de la información recopilada por la Secretaría de

Movilidad como parte de los estudios de monitoreo (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015) que se realizan de manera periódica en la ciudad.

Si bien es importante lograr recolección de datos representativos y equilibrados en sus distintas etapas, se debe evitar que la mayor parte del presupuesto y tiempo sean utilizados en la toma, análisis y validación de los estudios (Boyce et al., 1970). Tanto para la calibración se hubiese sido valioso contar con aforos simultáneos realizados durante días hábiles típicos de una misma semana, como para la etapa de estructuración de matrices semilla se hubiese querido contar con encuestas de interceptación y de hogares más actualizadas.

El número y ubicación de puntos sobre la red se definió con el fin de interceptar la mayor cantidad de pares sobre corredores principales, donde se consideraron 4 aspectos: cobertura (maximizar la cobertura de aforar OD), flujo (puntos con mayores volúmenes), Interceptación (los enlaces deben interceptar el mayor flujo) e independencia (los puntos deben ser linealmente independientes) (Yang y Zhou, 1998).

Considerando que los estudios de aforos se definieron tomando la categoría de livianos de manera integral fue necesario cruzar esta base con la de frecuencia y ocupación visual de transporte informal, en tanto para el periodo pico de la mañana se definieron controles de manera independiente para vehículos particulares y taxis.

Luego de obtener los volúmenes de control para la hora pico un día hábil representativo, se procedió a asociar cada uno de los accesos con arcos definidos en la red, con los  $i$  y  $j$  que representan el arco sobre el cual se definen los volúmenes de control, se procedió a cargar en Emme4.0 los volúmenes que se usaron para la calibración de: automóviles, taxis, motocicletas, camiones pequeños y camiones grandes.

Cada uno de los volúmenes de control definidos, cumple un rol estratégico en la integralidad de los controles, lo anterior teniendo en cuenta que definen pantallas asociadas de ingreso y salida de los principales centros atractores y generadores de viajes, durante el periodo de simulado.

Una vez se analizó la consistencia global en la asignación del modelo y se realizaron los respectivos ajustes, se calibró el modelo mediante la reproducción de los volúmenes de

control en la asignación. La calibración que se realizó de manera independiente para cada modo de transporte en un único proceso de asignación, culminó una vez los indicadores de bondad de la calibración se consideraron adecuados.

### **2.8.2 Ajuste de Matrices**

Para la corrección de las matrices del transporte, se desarrolló una metodología fundamentada en la aplicación de factores de ajuste a la submatriz de usuarios que pasan por cada uno de los puntos de control ubicados sobre la red vial, de tal manera que esta alcance la magnitud del aforo referenciado de campo.

Al aplicarse un solo factor de ajuste para toda la submatriz de viajes que transitan por cada punto de control, se mantiene en escala el patrón de viajes que tiene la mayor probabilidad de ocurrencia (movilización original de la demanda combinada). Este procedimiento fue aplicado únicamente sobre puntos de la red en los que se tuvo déficit o superávit de viajes respecto a los aforos observados.

Finalmente, es importante comentar que durante la aplicación del proceso de corrección por conteos, se ejecutaron ciclos de aproximación de la matriz en ajuste con respecto a los volúmenes totales del aforo. La aplicación de este proceso busca regularizar la probabilidad de máxima entropía, dando la posibilidad de mantener el equilibrio en el patrón de viajes de la matriz en corrección.

### **2.8.3 Indicadores de Bondad de la Calibración**

El modelo se considera calibrado cuando los volúmenes de tránsito están acordes con los observados, en tanto el flujo en cada uno de los volúmenes de control fue representado adecuadamente. Si bien se consideraron para este fin diferentes análisis que involucran los flujos observados y simulados como: análisis de diferencias absolutas, diferencias porcentuales y agrupaciones de pantallas, los principales indicadores que definieron la bondad de la calibración del modelo fueron el GEH, los indicadores de la regresión lineal (pendiente, término independiente y correlación) y la prueba de hipótesis de T-Student.

En esta etapa se validaron los indicadores de calibración mencionados y, se comparó el tiempo medio de viaje de los usuarios con respecto a la información asociada a la encuesta de movilidad de 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).

## 2.9 Análisis de Sensibilidad

El primer análisis de sensibilidad se realizó para las funciones de demora sobre un tramo representativo del corredor de la Avenida Boyacá en el cual se contó con información detallada, el segundo análisis de sensibilidad se realizó sobre el VOT estimando la captación de demanda de un proyecto hipotético simulando bajo las condiciones de calibración y con un aumento del 15% en el VOT, el último análisis se realizó mediante la variable de considerar las precargas asociadas al transporte público.

### 2.9.1 Funciones Flujo – Demora

A partir de los resultados obtenidos mediante el Estudio de Funciones Volumen-Demora BPR y Cónica en Vías Multicarriles de Bogotá (Márquez et al., 2014). Se eligió el tramo sobre el cual se realizó el análisis de sensibilidad. Considerando el detalle de la caracterización en el estudio desarrollado sobre la Avenida Boyacá el cual en que se estimaron las funciones independientes para carriles internos y externos, se eligió este tramo como sujeto de análisis.

**Tabla 2-1:** Parámetros Estimados en Funciones de Demora.

Avenida	Sentido	No. Tramo	BPR			Cónica	
			$\alpha$	$\beta$	R <sup>2</sup>	$\alpha$	R <sup>2</sup>
Norte	N-S	1	1.081 (24.4)	2.789 (11.6)	83.6	3.094 ( 9.8)	82.7
	S-N	2	1.234 (20.6)	3.177 ( 9.6)	79.7	3.941 ( 7.0)	75.1
Boyacá	S-N (Interior)	3	0.497 (21.0)	2.384 ( 8.8)	76.5	Sin ajuste	
	S-N (Externo)	4	0.915 (17.0)	3.101 ( 7.9)	73.5	2.994 ( 7.7)	63.2
	N-S (Interior)	5	0.471 (18.6)	2.285 ( 8.2)	75.0	Sin ajuste	
	N-S (Externo)	6	0.761 (24.5)	3.143 (11.6)	85.0	3.215 ( 9.4)	66.1
El Dorado	E-O	7	0.865 (26.6)	2.436 (13.5)	86.4	2.620 (11.8)	79.8
	O-E	8	0.854 (29.9)	2.097 (13.5)	87.6	2.587 (12.0)	81.1

*Fuente: Tomado de Estudio de Funciones Volumen-Demora BPR y Cónica en Vías Multicarriles de Bogotá (Márquez et al., 2014).*

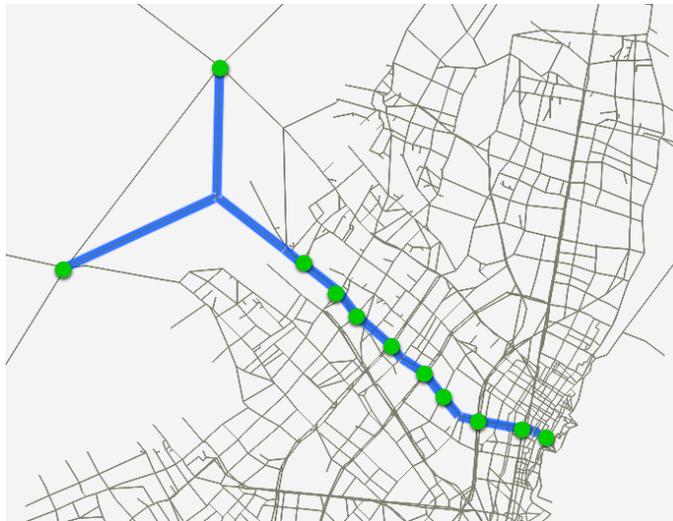
Una vez definido el tramo, se hizo la **elección de las funciones** que mejor se ajustan y definieron en el banco del proyecto definido en Emme 4.0, una vez cargadas las funciones se realizó el **ajuste de la red modelada** en tanto la función volumen demora se carga como un atributo de arco.

Estructurado el escenario de sensibilidad, se realizó la **asignación del modelo** y se **estimaron los indicadores de operación** en el área de influencia del análisis de sensibilidad, este proceso se realizó tanto para la condición calibrada como para la condición de sensibilidad, como actividad se procesaron los resultados obtenidos.

### 2.9.2 Valor Subjetivo del Tiempo

La sensibilidad ante el VOT se desarrolló mediante el análisis de un proyecto hipotético como lo es la “Autopista Regional de Occidente” definido sobre la Calle 63 o Avenida José Celestino Mutis. Las definiciones de las condiciones de operación se realizó así: inicia en la Carrera 7, pasando luego por el Río Bogotá en donde presenta una bifurcación conectando al acceso de la Calle 13 y al Acceso de la Calle 80, la tarifa de uso se definen por kilómetro a un valor de \$300/km y una tarifa de acceso de \$500 (sin variaciones por congestión), tiene accesos y salidas restringidas en la red (marcados en verde en la Figura 2-12), 2 carriles por sentido que presentan condiciones operativas iguales a las calzadas rápidas típicas de la Avenida Boyacá.

**Figura 2-12:** Proyecto Hipotético Autopista Regional de Occidente.



*Fuente: Elaboración propia.*

Una vez realizada la caracterización del proyecto en Emme se asignaron los escenarios, mientras que el escenario de calibración considera valores del tiempo para los automovilistas, así: estrato 1-2 \$56/min, estrato 3 \$79/min, estrato 4 \$95/min, estrato 5-6

\$105/min y suburbanos \$130/min, el escenario de sensibilidad consideró un incremento en los VOTs del 15%.

Bajo las anteriores condiciones se realizó la simulación del proyecto tanto para las condiciones base como para la sensibilidad. Posteriormente se realizó la estimación de indicadores técnicos para las dos condiciones simuladas, como parte de estos indicadores se consideraron: demanda captada (durante el periodo pico de la mañana), recorrido medio de los usuarios en el proyecto e ingresos estimados (durante el periodo pico de la mañana).

### **2.9.3 Precargas Asociadas al Transporte Público**

Existen corredores importantes en donde la flota de transporte público puede llegar participar en más del 20% de la capacidad de la infraestructura, para determinar la influencia que generan las demoras derivadas por la operación del transporte público en el modelo de transporte se realizó el análisis de sensibilidad que buscó cuantificar los cambios que se pueden generar en los indicadores de calibración por la no consideración del transporte público.

Luego de estructurar una macro temporal que no considera las precargas del transporte público el modelo fue asignado, los resultados se procesaron obteniendo los nuevos resultados en los indicadores de calibración, los resultados se compararon con los obtenidos durante la calibración.

## 3.Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para cada una de las actividades definidas en la metodología. A partir de estos procesos se estructuró un modelo de transporte que representa las condiciones el sistema de movilidad para el año 2015, constituyéndose en una herramienta para la planeación del sistema de transporte privado de la Ciudad de Bogotá.

Se presentan secuencialmente, tanto los resultados como los productos generados en cada uno de los componentes estudiados que definen el modelo de transporte. Una vez definido el periodo de modelación y la estructura del modelo de transporte, se realizaron las actividades de validación y actualización de los elementos que definen la oferta y la demanda de transporte, se estimaron las precargas generadas por el transporte público y a partir de la generación de las macros de asignación se calibró el modelo sobre el cual se desarrollaron los análisis de sensibilidad.

### 3.1 Red de Modelación

La red de modelación fue definida tomando como referencia el escenario base de calibración del modelo de transporte de Cargos por Congestión (Secretaría Distrital de Movilidad, 2013), de esta manera la consolidación de la red base para la calibración del modelo de transporte de 2015 se definió mediante los procesos de validación y actualización de la red de referencia, en esta etapa fueron de gran utilidad los análisis geográficos que se realizaron en el software TransCad.

El modelo de oferta permite la representación de la operación tanto del transporte privado como de las rutas de transporte público, que se constituyen como una precarga del modelo de transporte privado. Los resultados de validación y actualización de la red de transporte se pueden clasificar en 4 tipologías principales: la exclusión de red vial asociada a la incorrecta representación del sistema de transporte, la eliminación de red vial del modelo de partida que no hace parte de la oferta del sistema, la modificación de links existentes y, por último la adición de nueva red.

Una vez concluida la actualización, se obtuvo una red compuesta por 2,517 nodos regulares y 11,043 enlaces, los cuales representan la totalidad de la oferta vial de la zona de estudio considerada para la modelación. En contraste con la red original que está compuesta por 3,632 nodos regulares y 13,308 enlaces, se tienen reducciones del 31% en nodos y 17% en arcos.

La Tabla 3-1, presenta la cantidad de arcos por tipología para el escenario de referencia y para el escenario de oferta consolidado del 2015.

**Tabla 3-1:** Tipologías y Cambios en la Red de Modelación [14].

Tipología	Descripción	Arcos	
		Escenario CxC	Escenario 2015
2	Red Nacional Nivel 1	26	26
3	Red Nacional Nivel 2	58	58
4	Red Urbana Nivel 1 (Calzadas Rápidas)	245	244
5	Red Urbana Nivel 1 Calzadas de Servicio	286	287
6	Red Urbana Nivel 2	739	741
7	Red Urbana Nivel 3	396	396
8	Red Urbana Nivel 4	1807	1729
9	Red Urbana Nivel 5	2431	2430
10	Conexiones Calzadas Rápidas - Calzadas de Servicio	250	250
15	Red Troncal*	1249	332
21	Conexiones Red Troncal - Red de Tráfico Mixto	0	20
103	Ascenso a Transporte Masivo- Sube a Estación.	446	0
104	Descenso a Transporte Masivo- Baja de Estación.	444	0
105	Ascenso a Transporte Masivo- Sube al Portal.	22	0
106	Descenso a Transporte Masivo- Baja del Portal.	22	0
160	Conexiones Transporte Masivo Peatonales	44	0

*Fuente: Elaboración propia a partir la encuesta de movilidad 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

En los siguientes títulos se describe el detalle asociado a los cambios en la red de transporte del modelo de oferta privado.

### 3.1.1 Eliminación de Arcos

Como parte del análisis de la red de partida, se encontraron arcos asociados a la operación de sistemas de transporte público que no presentan funcionalidad para el modelo de transporte privado y más aún, en algunos casos no permiten la representación de las precargas asociadas a la operación de los servicios públicos. Como parte del recorte de la red de transporte público, se eliminaron los arcos tipo 103, 104, 105, 106, 160 y algunos arcos asociados a la red de transporte masivo.

La Figura 3-1 presenta de manera general la ubicación de los arcos que se eliminaron y se asocian a la red de transporte masivo, marcándose en color rojo la red troncal y en color amarillo la red otros proyectos de transporte.

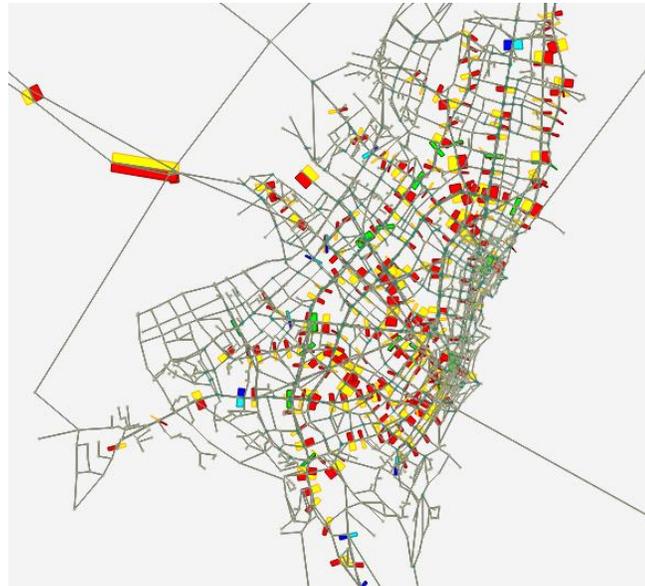
**Figura 3-1:** Selección de Arcos Eliminados Relacionados a la Red Troncal.



*Fuente: Elaboración propia.*

Como se mencionó anteriormente, se suprimieron los accesos y salidas a los proyectos de transporte masivo, dado que no presentan funcionalidad en el modelo de oferta de transporte. La Figura 3-2 presenta los accesos y salidas que se eliminaron de la red de transporte masivo.

**Figura 3-2:** Selección de Arcos Eliminados Asociados a Accesos, Salidas o Conexiones de Red de Transporte Masivo.



*Fuente: Elaboración propia.*

La revisión detallada de la red de transporte, permitió identificar arcos no asociados al transporte privado. La Figura 3-3 presenta gráficamente 100 arcos que se eliminaron como parte de la oferta complementaria que no conforman la red de transporte privado. Este segmento de arcos eliminados se puede clasificar en 3 grupos: cambio en la direccionalidad del link, red que no se encuentra en operación y red modo tranvía.

**Figura 3-3:** Selección de Arcos Eliminados Complementarios que No Definen la Red de Oferta.



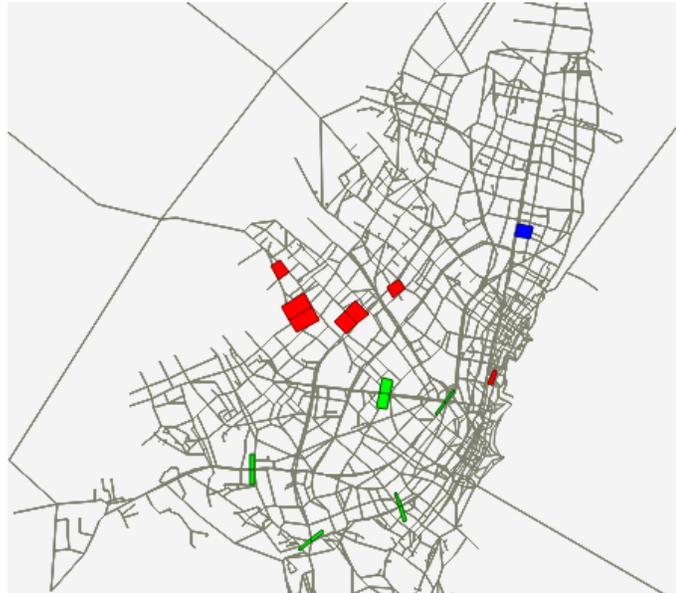
*Fuente: Elaboración propia.*

### **3.1.2 Implementación de Nueva Red de Transporte**

Derivado de la revisión de la red, se consideró necesario definir nuevos arcos con el propósito de representar de manera adecuada las condiciones de oferta. De manera complementaria a los 20 arcos que sirven como conexión virtual entre los carriles exclusivos y los carriles de tráfico mixto, se definieron arcos complementarios que representan cambios en la infraestructura, dentro de estos cambios se destacan: la calzada Oriente – Occidente de la Calle 45 entre las Carreras 13 y 7, y la conexión de la Calle 63 entre la Avenida Rojas y la Avenida Boyacá.

La Figura 3-4 presenta en código de colores los nuevos arcos implementados en la red, en verde las conexiones troncales – mixto, en azul los nuevos arcos sobre la red troncal y en rojo los la nueva red de tráfico mixto.

**Figura 3-4:** Arcos Nuevos en la Red de Oferta.



*Fuente: Elaboración propia.*

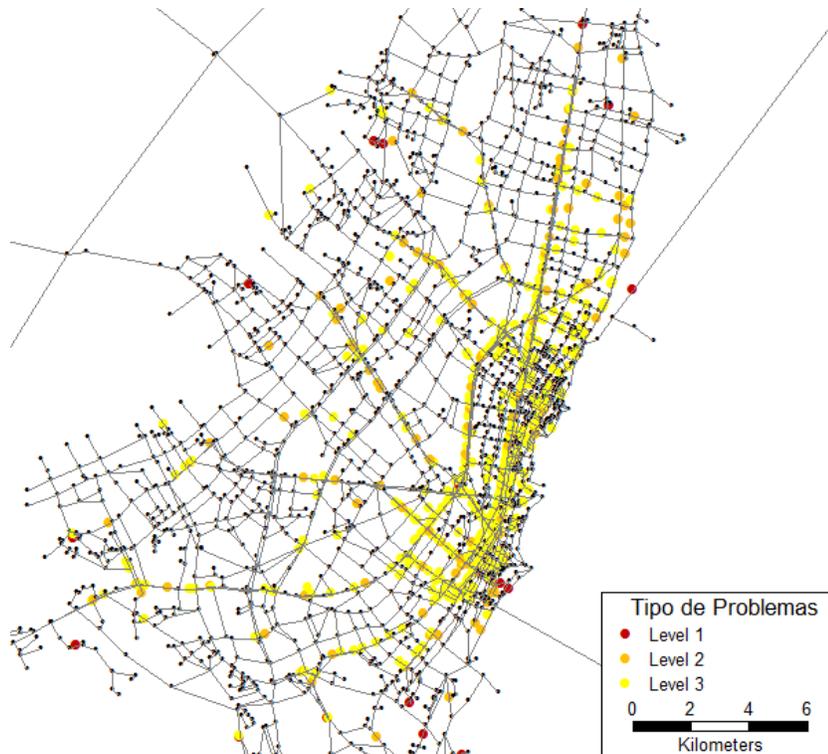
Como parte de la incorporación de nuevos arcos de en la red, se definieron los atributos requeridos para la asignación del modelo, los mismos se especificaron considerando las características físicas y operativas del corredor donde se creaban arcos o mediante la asociación con infraestructura similar. Dentro de estos atributos se incluyeron: modos de transporte, carriles, capacidades, funciones de demora y velocidades a flujo libre.

### 3.1.3 Conectividad

Como resultado de la validación se obtuvieron un total de 576 nodos con potenciales errores en la conectividad de arcos, de manera manual, se revisó cada uno de estos nodos identificando 4 problemas reales.

La dispersión espacial de los nodos con potenciales conflictos en conectividad, se presenta en la Figura 3-5.

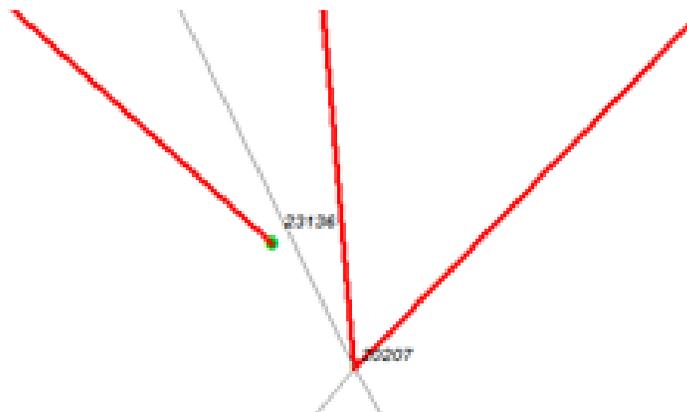
**Figura 3-5:** Nodos Potenciales con Errores de Conectividad.



*Fuente: Elaboración propia*

A modo de ejemplo en la Figura 3-6 se muestra uno de los problemas de conectividad encontrados en la red de transporte.

**Figura 3-6:** Ejemplo de Error de Conectividad de la Red.



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.1.4 Atributos de la Red de Transporte

Como parte de los atributos para la actualización de la red de oferta, se encuentran los modos y carriles habilitados en cada uno los arcos de la red. En referencia a los modos de transporte, los trabajos realizados permitieron actualizar la oferta disponible para los vehículos livianos (modo c), los camiones pequeños (modo k), los camiones grandes (modo h) y los vehículos de transporte masivo de TransMilenio (modo t).

#### 3.1.4.1 Modos de la Red de Transporte

La actualización de la red de oferta habilitada para los vehículos livianos (modo c), permitió establecer que 10,629 arcos mantienen con el modo con respecto al modelo de referencia (código de color verde), se habilitan 45 arcos más (código de color rojo) y 17 de los arcos nuevos incluyen el modo de transporte (código de color azul). Se presenta en la Figura 3-7 la red habilitada para vehículos livianos.

**Figura 3-7:** Transporte Habilitada para Vehículos Livianos (Modo C).



*Fuente: Elaboración propia*

Para definir la red de oferta de camiones pequeños y grandes se consideró el Decreto de Carga 520 de 2013 (Alcaldía Mayor de Bogotá, Decretos 520 de 2013). Como se resultado se tiene un total de 10,408 arcos que conservan el modo con respecto a la red de referencia, 266 arcos en los que se habilita el modo y 17 arcos nuevos que permiten el

tránsito de camiones pequeños. En la Figura 3-8 se presenta la red de transporte habilitada para camiones pequeños, es importante resaltar que los códigos de colores se mantienen con respecto a la figura anterior.

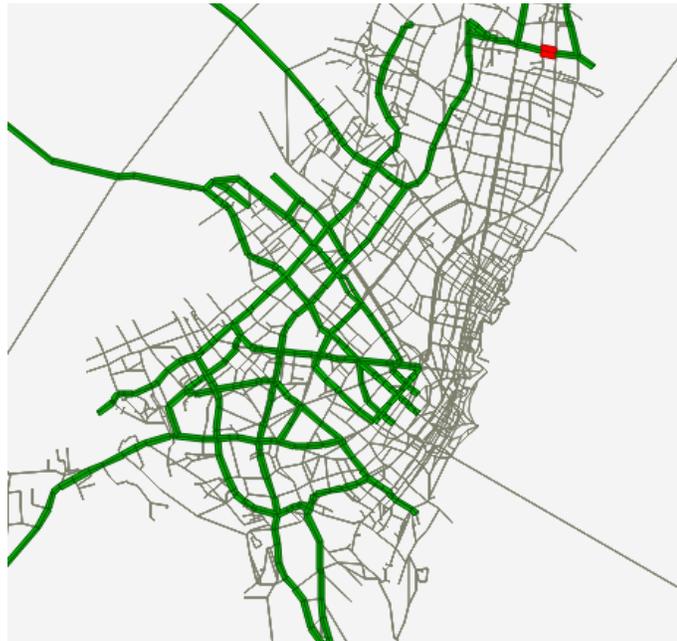
Como se aprecia, los principales cambios se asocian a la red de calzadas rápidas, las cuales de acuerdo con los aforos vehiculares realizados en el estudio de monitoreo del año 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015) registran volúmenes de camiones pequeños considerables, lo que a su vez es consistente con la normatividad vigente.

**Figura 3-8:** Red de Transporte Habilitada para Camiones Pequeños (Modo K) - Cambiar.



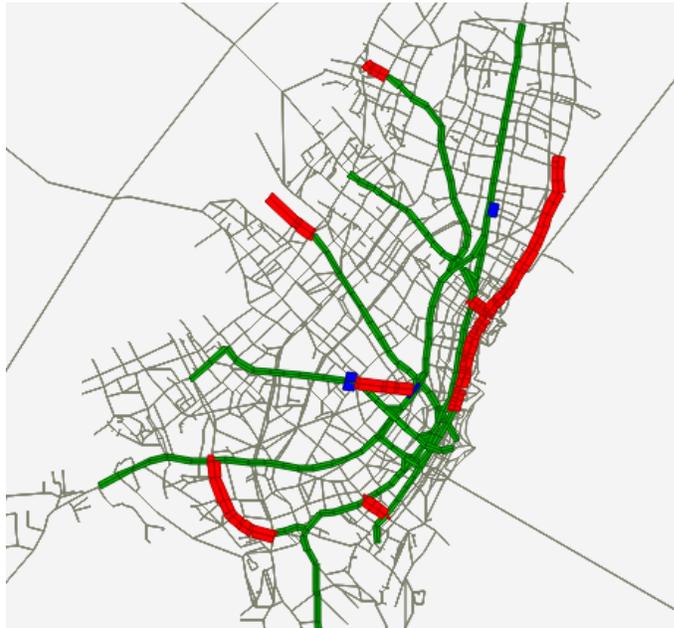
*Fuente: Elaboración propia*

En cuanto al modo H que representa los camiones grandes, no se definieron cambios importantes en la red, de esta manera 5,325 arcos mantienen el modo, en 2 arcos existentes se habilita el modo y 9 arcos nuevos permiten el tránsito de estos vehículos de carga. Para el modo de transporte H, se destaca el hecho de que más de la mitad de la red está restringida. La Figura 3-9 presenta los arcos sobre los cuales se permite el tránsito de camiones grandes.

**Figura 3-9:** Red de Transporte Habilitada para Camiones Grandes (Modo H)- Cambiar.

*Fuente: Elaboración propia*

Al analizar el modo T que representa el subsistema de transporte masivo, se mantienen un total de 343 arcos que ya tenían el modo habilitado, se habilitan un total de 343 arcos existentes y se crean 5 arcos nuevos que se incluyen en este modo de transporte. Como se ilustra existen cambios importantes en la oferta de este modo, dichas modificaciones se deben principalmente a la necesidad de representar el tránsito de rutas de transporte del sistema sobre la red de tráfico mixto. La Figura 3-10 presenta los corredores habilitados para el tránsito de vehículos del sistema masivo.

**Figura 3-10:** Red de Transporte Habilitada para el Transporte Masivo (Modo T).

*Fuente: Elaboración propia*

Es importante resaltar que el modelo incorpora otros modos de transporte como la alimentación (a), el intermunicipal (l), el SITP urbano (b) y el SITP complementario (g), considerando la oferta de transporte público que fue suministrada por TransMilenio S.A. No se detallan los ajustes para la representación del transporte público en tanto no considera un modelo de elección de ruta, siendo servicios estáticos en la red.

#### **3.1.4.2 Carriles de la Red de Transporte**

La revisión del número de carriles del modelo de referencia concluyó con los siguientes resultados: 10,717 arcos de la red de transporte mantienen su número de carriles, se modificaron 304 links y se definieron carriles para 22 nuevos arcos de la red de transporte. La Figura 3-11 muestra los cambios en la red para la representación de los carriles.

**Figura 3-11:** Cambios en la Caracterización de Carriles de la Red de Oferta.

*Fuente: Elaboración propia*

Excluyendo la red virtual (conexiones calzadas troncales y calzadas mixtas), la red troncal y los conectores, se cuantificó la longitud de la red de modelación como 2,930 km, los cuales se ven representados por un total de 5,400 km de carriles. En la Figura 3-12 se presenta la intensidad de la oferta de carriles, es importante resaltar que los valores fluctúan entre 1 y 6 carriles sentido.

**Figura 3-12:** Intensidad de la Oferta de Carriles.

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.1.5 Cuotas de Peaje

A partir de la información de tarifas y tráficos asociados a los peajes del área de influencia del proyecto en el año 2015, se estimaron las tarifas de camiones pequeños y camiones grandes, las tarifas de camiones se definieron ponderando los costos asociados a cada categoría por el flujo vehicular, destacando que las vías que pueden llegar a competir entre sí, mantuvieron su jerarquía en cuanto al cobro. En la Tabla 3-2 se presentan los resultados obtenidos en la estimación de las cuotas de los peajes del área de influencia del modelo.

**Tabla 3-2:** Cuotas de Peaje para Segmentos de Demanda del Modelo [14].

Nombre Peaje	Ubicación	Tarifa de Cobro		
		Automóvil	Camión Pequeño	Camión Grandes
Andes	Autopista Norte	\$ 7,200	\$ 12,150	\$ 33,850
Fusca	Carrera 7	\$ 7,200	\$ 12,150	\$ 33,850
Siberia	Calle 80	\$ 8,300	\$ 11,600	\$ 29,600
Río Bogotá	Calle 13	\$ 6,700	\$ 9,400	\$ 24,400
Corzo	Calle 13	\$ 6,700	\$ 9,600	\$ 25,700
La Tebaida	Funza - Cota	\$ 10,600	\$ 12,700	\$ 55,200
Mondoñedo	Funza - Siberia	\$ 10,600	\$ 12,700	\$ 55,200
Boquerón	Bogotá - Villavicencio	\$ 9,900	\$ 13,200	\$ 58,500
Patios	Funza - Siberia	\$ 7,900	\$ 13,200	\$ 33,100

*Fuente: Elaboración propia*

Luego de georreferenciar la ubicación de cada uno de los peajes, se seleccionaron los arcos que representan de mejor manera la ubicación de las casetas de cobro. Las cuotas fueron cargadas en Emme considerando los sentidos de cobro de cada caseta, destacando que las estaciones Andes, Fusca, Río Bogotá, Corzo y Patios operan con cobros unidireccionales.

**Figura 3-13:** Peajes Implementados en el Modelo de Transporte.



*Fuente: Elaboración propia*

### **3.2 Actualización de la Demanda**

En este acápite se presentan los resultados de la actualización de cada uno de los elementos que conforman el modelo de demanda. Como parte de los elementos analizados se cuenta: la zonificación del modelo, la conectividad de los centroides a la red y las matrices semilla.

### 3.2.1 Actualización de Matrices Semilla

Luego de aplicar las metodologías definidas para la actualización de la demanda base, se lograron las matrices semilla con las cuales se inició la calibración del modelo.

Los resultados de los procesos que permitieron la actualización y el cálculo de las matrices finales se presentan a lo largo de este capítulo, a modo de resumen se presenta en la Tabla 3-3 que muestra las dimensiones de las matrices semillas obtenidas, es importante resaltar que se asignaron las matrices equivalentes a automóviles.

**Tabla 3-3:** Dimensiones de las Matrices Semilla Obtenidas [14].

Modo de Transporte	Segmentos	Dimensión de Viajes		
		Unipersonales	Vehiculares	Vehiculares Equivalentes
Vehículo Particular	Urbanos, Estrato 1-2	35,163	20,338	20,338
	Urbanos, Estrato 3	108,821	66,039	66,039
	Urbanos, Estrato 4	53,441	33,747	33,747
	Urbanos, Estrato 5-6	38,824	25,121	25,121
	suburbanos	18,077	10,611	10,611
Subtotal Vehículo Particular		<b>254,327</b>	<b>155,856</b>	<b>155,856</b>
Taxi	Taxi Ocupados	50,261	37,230	37,230
	Taxi Vacíos	N.A.	19,555	19,555
Subtotal Taxi		<b>50,261</b>	<b>56,785</b>	<b>56,785</b>
Motocicleta	Motocicleta	Sin Registro	66,885	20,066
Subtotal Taxi		<b>Sin Registro</b>	<b>66,885</b>	<b>20,066</b>
Camiones	Camiones Pequeños	N.A.	5,937	11,873
	Camiones Grandes	N.A.	1,927	4,817
Total		<b>N.A.</b>	<b>7,863</b>	<b>16,690</b>

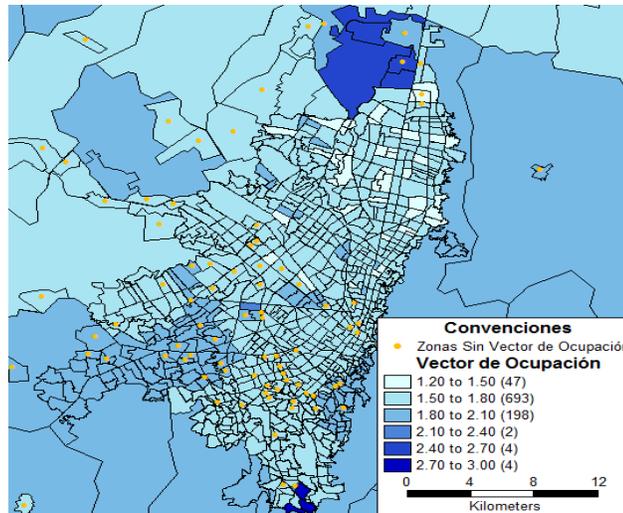
*Fuente: Elaboración propia*

#### 3.2.1.1 Matrices de Vehículo Particular

Tomando como referencia la matriz definida en la encuesta de movilidad de 2011, la matriz origen-destino de vehículos particulares está definida como la relación entre la matriz de viajes en el modo de transporte y el promedio de ocupación vehicular, este promedio de ocupación es definido a nivel de ZAT y se asocia al origen del viaje. El vector de origen que contiene las ocupaciones en el modelo es “mo1”. La validación de los vectores de ocupación a nivel de ZAT, permitió identificar 86 zonas que no tenían definido el escalar de ocupación, estos valores se definieron por medio de la asociación con zonas de características socioeconómicas y espaciales similares.

Como resultado se obtuvo el vector completo de ocupación que presenta un valor medio de 1.7, un máximo de 2.9 y un valor mínimo de 1.3 pasajeros/vehículo. En la Figura 3-14 se presenta el mapa temático de los valores del vector de ocupación, se pueden apreciar mayores índices de ocupación en zonas periféricas, de igual manera se precisa una significancia de 0.7 al analizar la correlación entre el estrato y la tasa de ocupación.

**Figura 3-14:** Vectores de Ocupación Vehículo Particular.

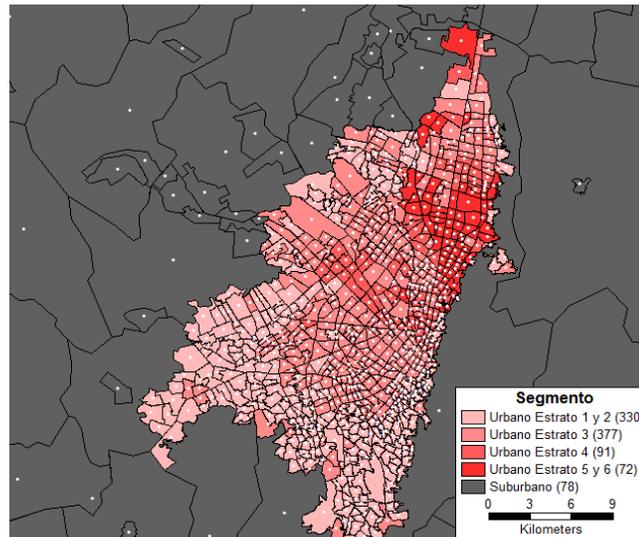


*Fuente: Elaboración propia*

Las matrices de viajes en transporte privado se segmentaron a nivel urbano, definiendo el estrato socioeconómico el cual se asocia a un valor modal definido para la zona de origen del viaje, lo anterior se mantiene en relación con la estructura del modelo de referencia. A nivel suburbano y considerando el nivel de agregación de la zonificación, se optó por crear una categoría única. La

Figura **3-15** muestra la distribución de estratos a nivel de ZAT en el área de influencia urbana y la agrupación integral para los viajes suburbanos. De acuerdo con lo mencionado, la matriz de vehículos particulares se segmentó en 5 grupos: estrato 1-2, estrato 3, estrato 4, estrato 5-6 y viajes suburbanos. En el modelo, la agrupación de estratos se definió por medio de arreglo usando los gd1, gd2, gd3 y gd4, que representan en orden creciente la segmentación definida para los viajes urbanos.

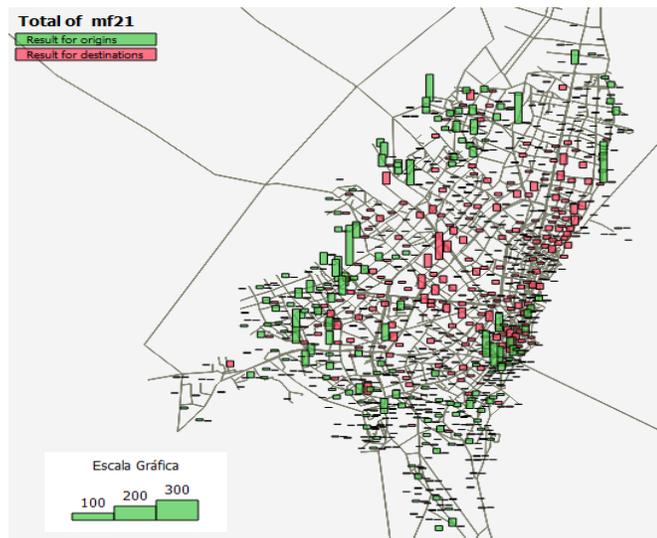
**Figura 3-15:** Segmentos de Demanda para el Vehículo Privado.



Fuente: *Elaboración propia*

Aplicado el factor de ocupación medio a la matriz de viajes en vehículo particular definida con una dimensión de 254,326 viajes, se obtuvo una matriz (de vehículos) de 193,198 vehículos, posteriormente la misma se segmentó en las 5 categorías ya definidas. La Figura 3-16 presenta valores de generación y atracción de viajes para la matriz urbana de vehículos privados de los estratos 1 y 2 (20,338 viajes vehiculares), a nivel espacial se evidencia la generación de viajes en zonas perimetrales que tienen como principales destinos el borde oriental de la ciudad.

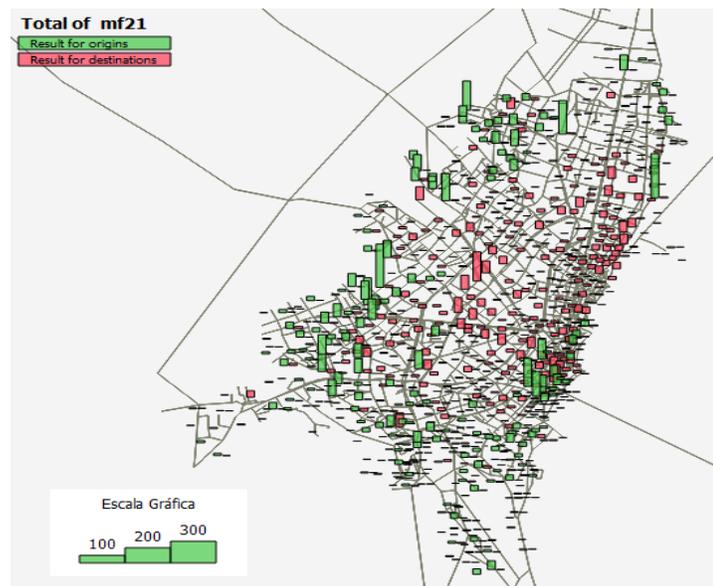
**Figura 3-16:** Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 1 y 2.



*Fuente: Elaboración propia*

Aplicando la misma metodología, se obtuvo la matriz de viajes vehiculares urbanos para el segmento representado por el estrato 3, esta matriz tiene una dimensión de 66,039 y representa el 42% de la demanda de viajes vehiculares del modo privado. La Figura 3-17 muestra los principales focos de generación y atracción de viajes vehiculares de usuarios estrato 3, en comparación con la matriz anterior, se puede apreciar la generación de viajes en zonas más céntricas.

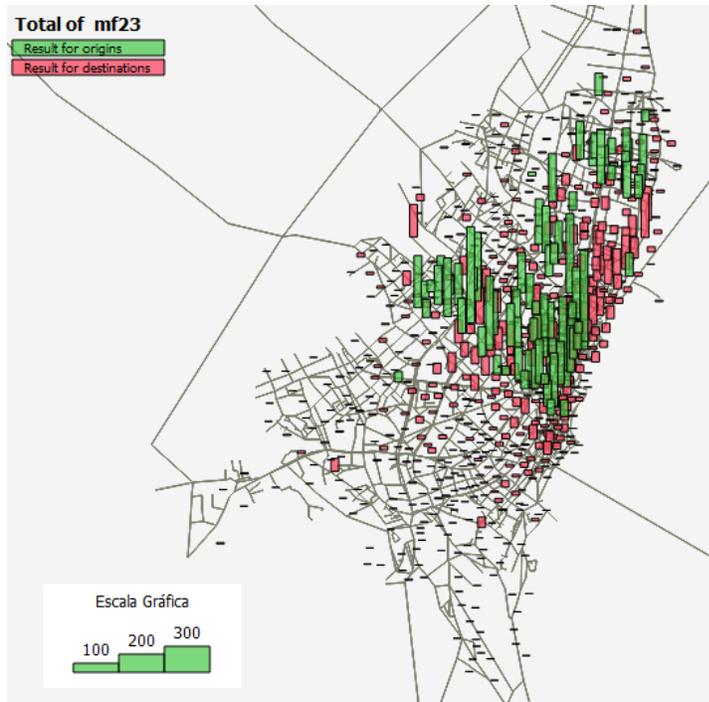
**Figura 3-17:** Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 3.



*Fuente: Elaboración propia*

Para el segmento de demanda que agrupa los viajes urbanos con origen en zonas estrato 4, se cuantificó un total de 33,757 viajes vehiculares los cuales representan el 22% de la demanda del modo vehículo particular. Se observa en la Figura 3-18 la ubicación espacial de los centros de generación y atracción para este segmento, destacándose la Calle 13 o Avenida Centenario como un límite de generación de viajes en este tópico de análisis.

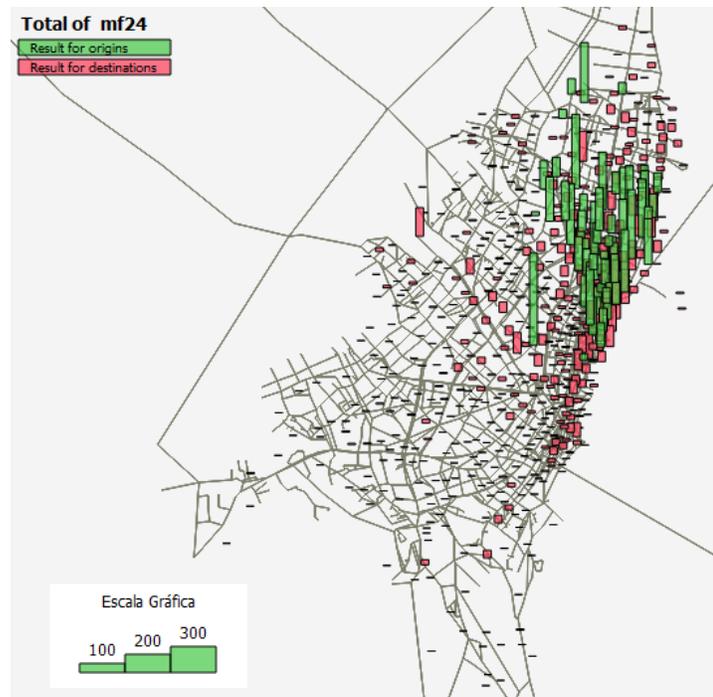
**Figura 3-18:** Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 4.



*Fuente: Elaboración propia*

La agrupación de viajes vehiculares realizados por usuarios de estrato 5 y 6 tiene una dimensión de 25,121 que constituyen el 16% del modo de transporte. La distribución espacial de las zonas de estrato alto se consolida en la zona nororiental de la ciudad, en la Figura 3-19 se aprecia el potencial de generación y atracción de este segmento, el área donde se desarrollan estos viajes está muy definida en el borde oriental y en la zona norte.

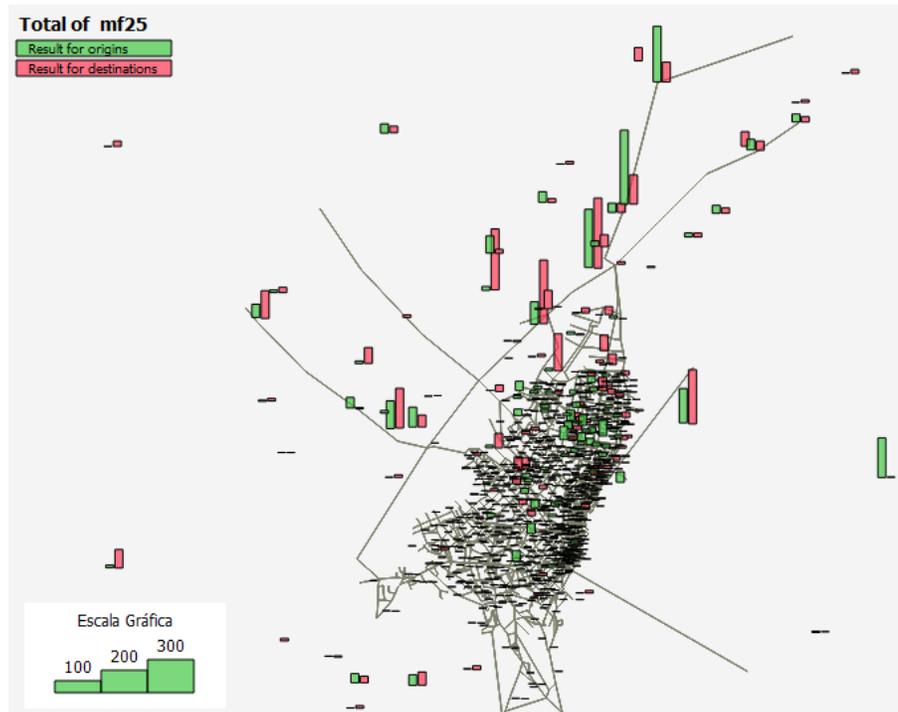
**Figura 3-19:** Matriz Semilla Vehículos Privado Estrato 5 y 6.



*Fuente: Elaboración propia*

El último segmento se asocia a viajes vehiculares suburbanos que no cumplen la condición de origen y destino dentro de Bogotá, estos representan el 7% de la demanda a nivel de vehículos, la dimensión de esta matriz es de 10,611 viajes, donde municipios como Facatativá, Mosquera, Funza, Cota, Tabio, Tenjo, Chía, Zipaquirá y La Calera tiene una participación considerable. La Figura 3-20 presenta la intensidad de generación y atracción de cada una de las ZATs para este segmento de demanda.

**Figura 3-20:** Matriz Semilla Vehículos Privado Suburbano.



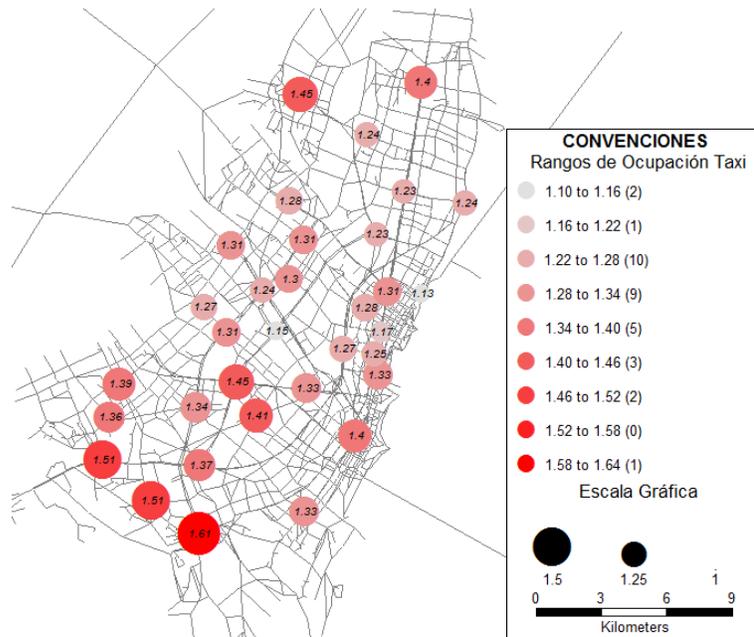
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.1.2 Matrices de Transporte Individual

Como se mencionó las matrices de referencia para el transporte individual se derivan del modelo de cargos por congestión. A continuación se presenta la metodología que permitió la definición de las matrices semilla para los taxis ocupados y vacíos.

La tasa de ocupación media para los taxis con pasajeros se definió como 1.35 pasajeros por vehículo, en la Figura 3-21 se presenta la distribución espacial de las intersecciones analizadas y la tasa de ocupación media obtenida para cada nodo, los valores estimados presentan variaciones de ocupación media en el rango 1.13 – 1.61, es notoria la reducción en la tasa de ocupación conforme se aproxima al borde oriental de la ciudad o centro expandido.

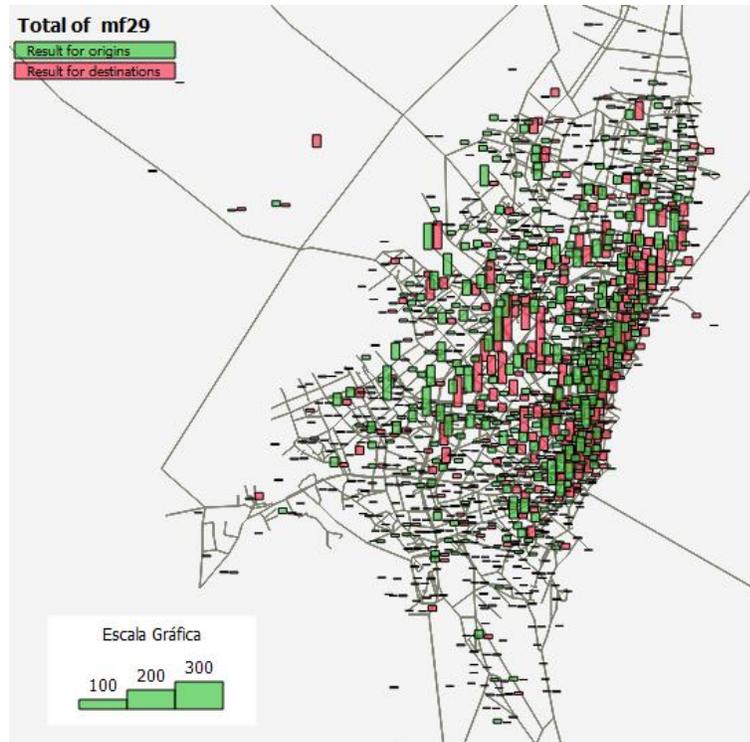
**Figura 3-21:** Análisis Ocupación de Taxis Observado en Bogotá.



*Fuente: Elaboración propia*

La aplicación de la tasa de ocupación media de taxis sobre una matriz de 50,261 viajes permitió cuantificar una matriz vehicular de 37,230. La Figura 3-22 presenta espacialmente la distribución de las zonas en las cuales se originan y terminan los viajes, se observa un patrón de generación/atracción similar a los automóviles destacando una dinámica importante en las zonas aledañas al corredor de la Avenida Boyacá.

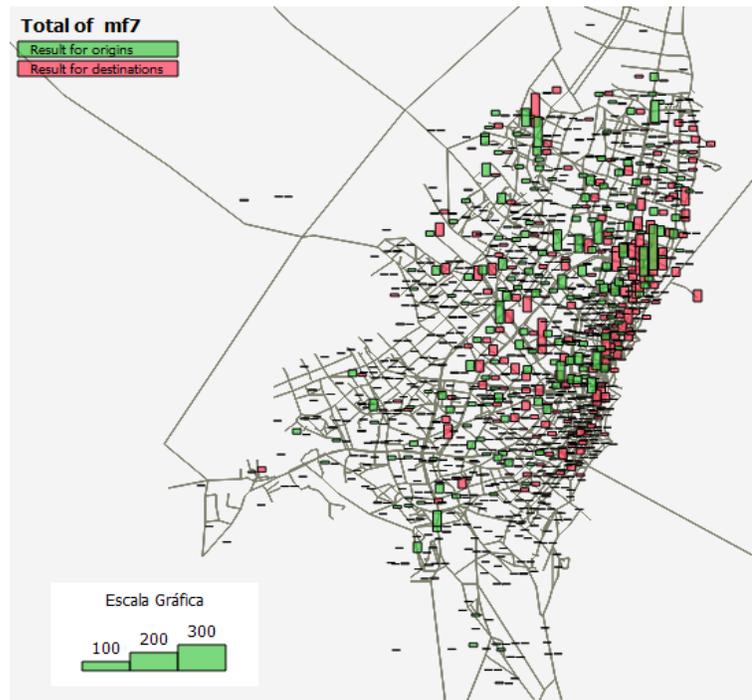
**Figura 3-22:** Matriz Semilla Vehicular, Taxi Lleno.



*Fuente: Elaboración propia*

La matriz semilla de taxis vacíos para el modelo tiene una dimensión de 19,555 viajes vehiculares, los cuales, según la Figura 3-23 tienen una dinámica prevalecte el borde nororiental de la ciudad.

**Figura 3-23:** Matriz Semilla Vehicular, Taxi Vacío.

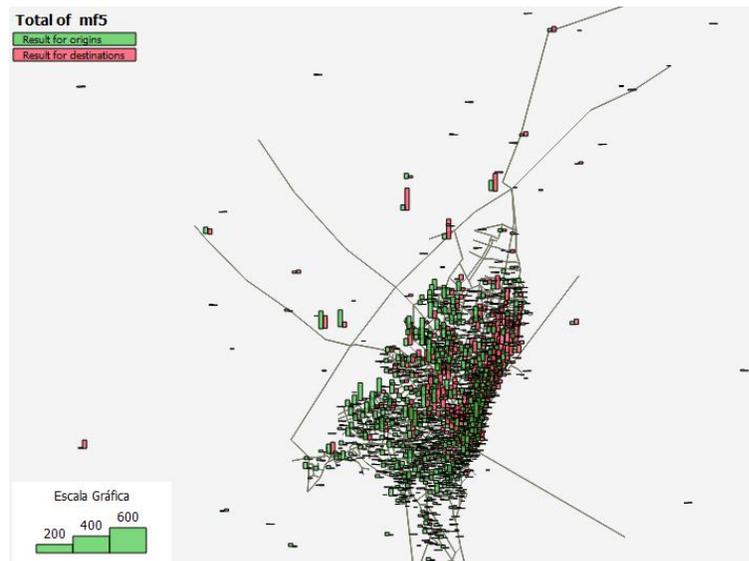


*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.1.3 Matrices de Motocicletas

Tomando como referencia la matriz de motocicletas definida mediante la encuesta de movilidad de 2011, se realizó un ajuste macro que consideró el aumento en el uso del modo en los últimos años. En la Figura 3-24 se presentan las ZATs asociadas a la generación y atracción de los viajes en motocicleta, en la misma se puede apreciar una distribución espacial heterogénea con respecto a los demás modos de transporte.

**Figura 3-24:** Matriz Semilla Vehicular, Motocicletas.



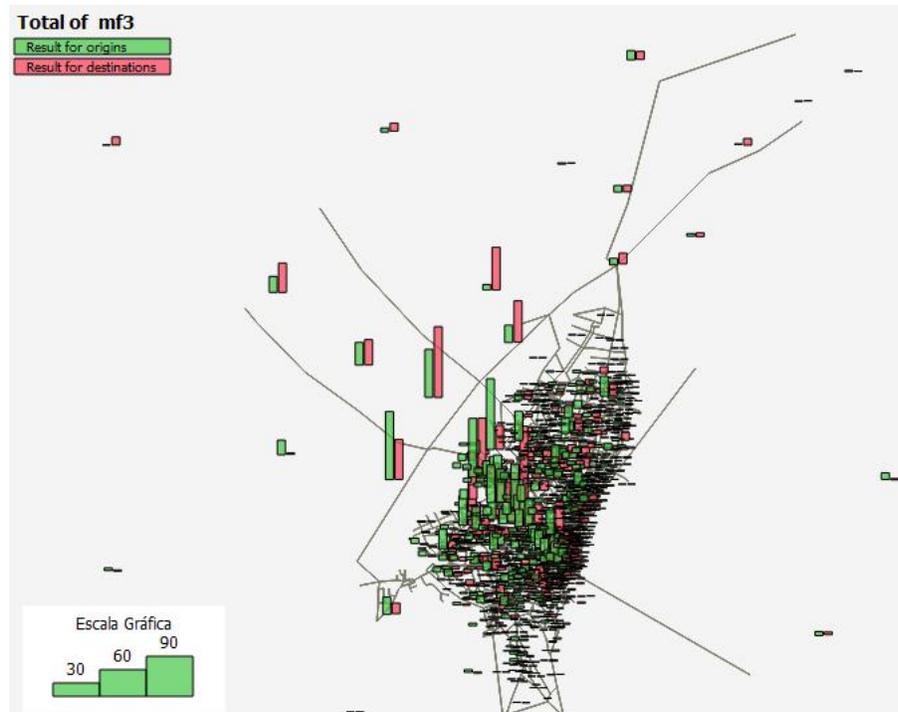
*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.1.4 Matrices de Transporte de Carga

Manteniendo las matrices de referencia definidas en el estudio de cargos por congestión, el transporte de carga se consideró mediante la segmentación de 2 grandes categorías, mientras que la primera está representada por los camiones pequeños, la segunda agrupa los camiones grandes, esta segmentación se mantuvo del modelo de referencia, dadas las restricciones en la oferta. La matriz semilla para los camiones no consideró cambios, en tanto los ajustes se realizarán en la etapa de calibración del modelo.

La matriz de viajes en camiones pequeños tiene una magnitud de 5,936, los cuales tienen una actividad consolidada en municipios de la sabana occidental como Facatativá, Madrid, Funza y Mosquera y, a nivel urbano las ZATs localizadas en proximidades de la Avenida Centenario. La Figura 3-25 presenta la cantidad de viajes producidos para cada una de las ZATs.

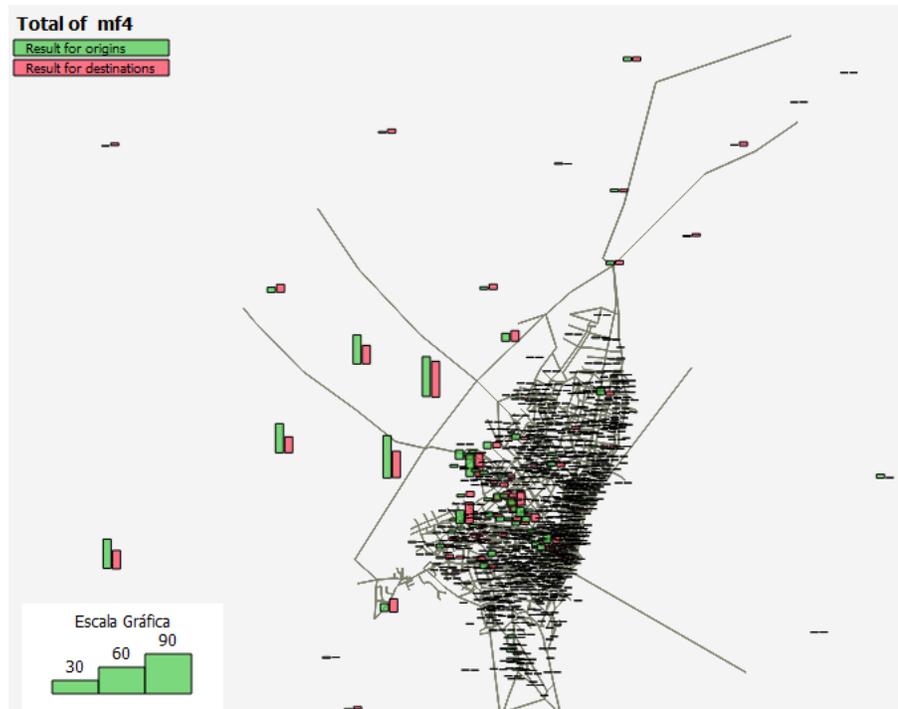
**Figura 3-25:** Semilla Vehicular, Camiones Pequeños.



*Fuente: Elaboración propia*

Como último segmento, se tienen los camiones grandes con una matriz de viajes vehiculares inicial de 1,927 unidades para el periodo pico de la mañana, la actualización de esta matriz consistió en eliminar los viajes no asignados en la red de oferta, esto se logró luego de hacer una asignación sobre la red caracterizada, en total se cuantificaron 727 viajes que pueden desarrollarse en las condiciones de oferta de 2015. La Figura 3-26 muestra los vectores de generación y atracción de viajes vehiculares de camiones grandes para cada ZAT, se observa una dinámica importante en la sabana occidental y sobre los corredores de la Calle 13 y la Avenida Ciudad de Cali.

**Figura 3-26:** Matriz Semilla Vehicular, Camiones Grandes.

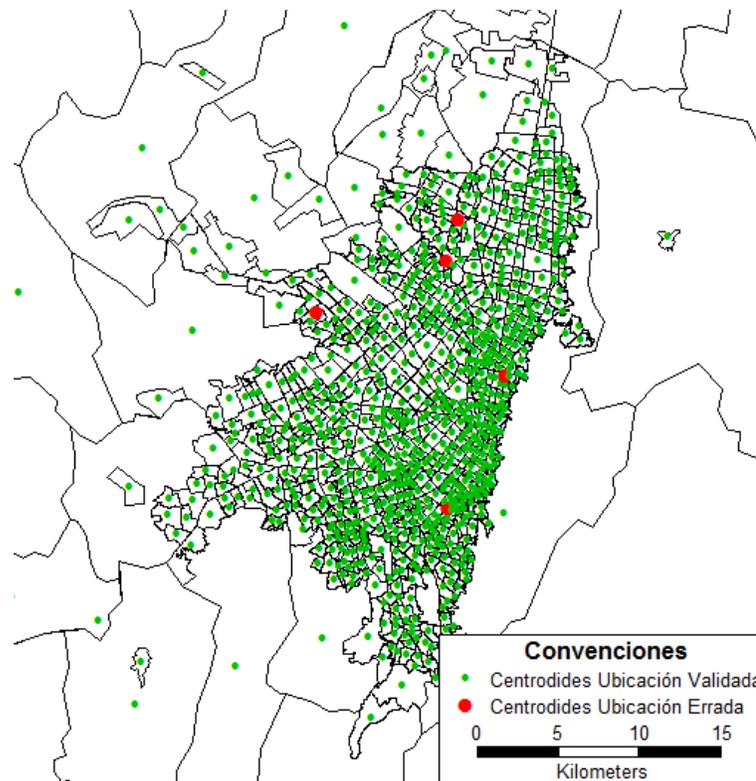


*Fuente: Elaboración propia*

### 3.2.2 Zonificación y Conectividad

En la validación de la zonificación se identificaron 2 zonas con más de una correspondencia en los elementos geográficos, la ZAT 794 se encuentra conformada por 2 áreas independientes mientras que la ZAT 806 suma 3 áreas independientes. En la Figura 3-27 se presentan los resultados de las validaciones de ubicación de centroides.

**Figura 3-27:** Validación de Ubicación de Centroides en la ZAT.



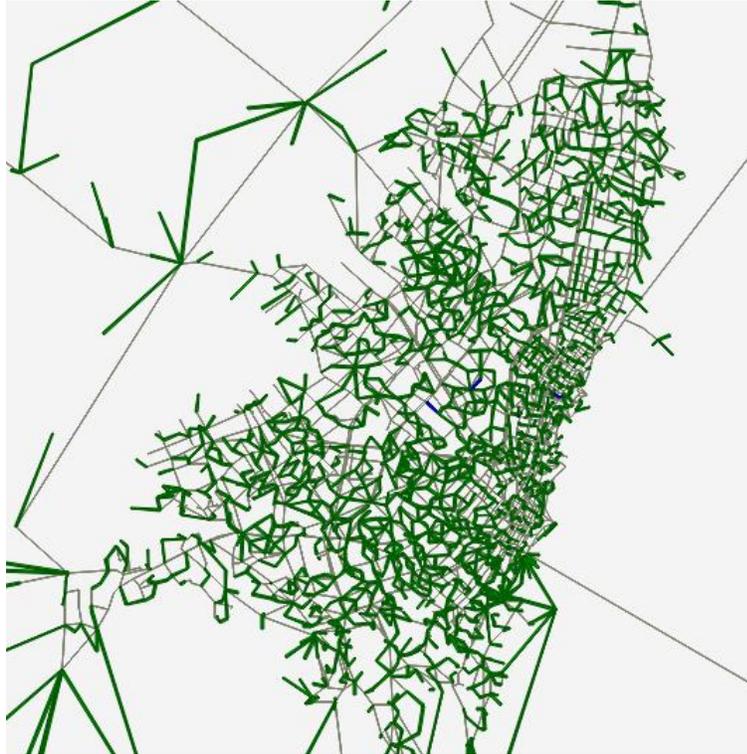
*Fuente: Elaboración propia*

A partir del análisis geográfico y correspondencia territorial de las zonas de análisis de tránsito (ZAT), se validó la pertinencia de la estructura definida para la zonificación a nivel urbano y a nivel regional.

El análisis de la conectividad se enfocó en revisar la correcta representación del acceso y la salida de los usuarios en la red de oferta. Mientras que la red de referencia contaba con 4,843 conectores, el modelo desarrollado consideró 4,530 enlaces tipo 1 (conectores), la revisión de estos arcos permitió identificar una cantidad de conectores que no tenían funcionalidad en el modelo, parte de estos se conectaban a redes que fueron eliminadas y

otro tanto no representaban adecuadamente los flujos. La Figura 3-28 presenta los conectores definidos para el modelo de transporte, en color azul se resaltan los conectores adicionados.

**Figura 3-28:** Conectores del Modelo de Transporte.



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.3 Precargas del Transporte Público

La digitalización de la red de oferta de transporte público y la definición de los intervalos de paso de las rutas definen el volumen de buses que precargan la red. Los resultados de la representación de la oferta, la definición de intervalos mediante la modelación del sistema de transporte público y las precargas que finalmente afectan la red se presentan a continuación.

### 3.3.1 Red de Servicios del Transporte Público

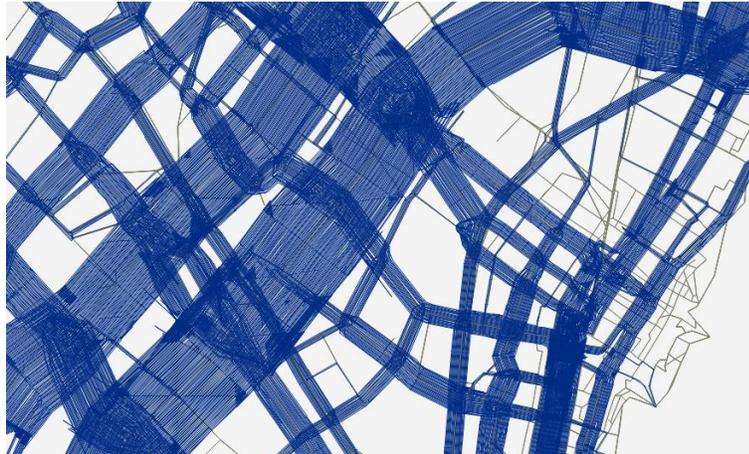
Dentro de la oferta de servicios troncales se consideraron los siguientes corredores: Avenida Caracas, Autopista Norte, Avenida Suba, Calle 80, Avenida Norte Quito Sur, Avenida de Las Américas, Eje Ambiental, Calle 26, Carrera 10 y Carrera 7. En total la oferta de transporte masivo se representó por medio de 141 servicios por sentido, definidos a nivel de parada. En la Figura 3-29 se pueden observar los servicios troncales y los itinerarios de las rutas de alimentación que complementan este sistema de transporte.

**Figura 3-29:** Rutas de Transporte Sistema TransMilenio.



*Fuente: Elaboración propia*

Considerando el estado de avance de la implementación del Sistema Integrado de Transporte Público a la fecha de desarrollo del trabajo, el escenario de calibración se estructuró bajo las condiciones de oferta del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), de la misma manera se resalta la dificultad para definir una situación estática de las rutas de transporte público remanente. En la Figura 3-30 se presenta la distribución de la oferta de 695 rutas urbanas y complementarias pertenecientes al SITP.

**Figura 3-30:** Rutas del Sistema Integrado de Transporte Público.

*Fuente: Elaboración propia*

El último subsistema de transporte público caracterizado corresponde a los servicios intermunicipales. Los derroteros según la normatividad vigente sobre corredores como la Autopista Norte, la Avenida Boyacá, la Calle 80, La Calle 13, la vía a la Calera y la vía al Llano, la Calle 6 y entre otros. La Figura 3-31 presenta la oferta de transporte público intermunicipal definida para el modelo por medio de 51 rutas.

**Figura 3-31:** Rutas de Transporte Público Intermunicipal.

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.3.2 Intervalos de Paso de las Rutas de Transporte Público

En este capítulo se presentan los intervalos obtenidos para las rutas de transporte público, considerando las metodologías usadas se presentan los resultados segmentados para rutas intermunicipales y rutas urbanas, en tanto la primera data se generó por medio de estudios de campo y la segunda se deriva de la modelación del transporte público.

Los resultados de los estudios de frecuencia en conjunto con los derroteros definidos por la Secretaría de Movilidad, permitieron estimar los intervalos, las tipologías vehiculares y la longitud en el modelo para las rutas intermunicipales. En la Tabla 3-4 se presentan los datos operativos más relevantes para las 51 rutas de transporte intermunicipal.

**Tabla 3-4:** Características Operativas Rutas Intermunicipales [14].

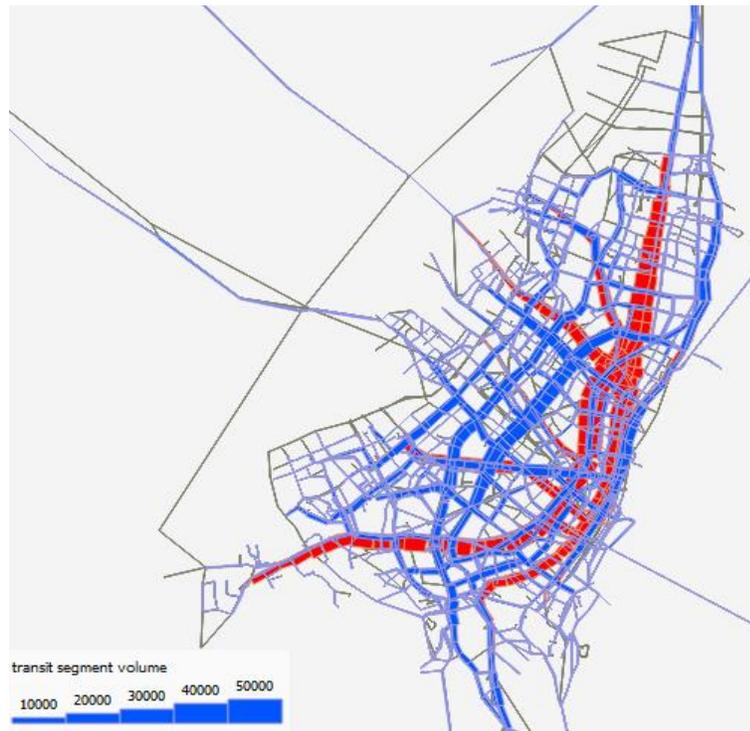
Ruta Emme	Descripción	Vehículo	Intervalo (min)	Longitud (km)
B1_ATS	Autopista Sur - Terminal	Bus	20.0	21.0
B1_C13	Calle 13 - Terminal	Bus	8.5	33.0
B1_VCI	Villavicencio - Terminal	Bus	5.0	33.2
B2_ATS	Terminal - Autopista Sur	Bus	30.0	22.4
B2_C13	Terminal - Calle 13	Bus	12.0	34.5
B2_VCI	Terminal - Villavicencio	Bus	15.0	34.6
B3_ATN	Autopista Norte - Terminal	Bus	4.0	52.6
B3_ATS	Autopista Sur - Terminal del Sur	Bus	10.0	9.9
B4_ATN	Terminal - Autopista Norte	Bus	6.0	51.7
B4_ATS	Terminal del Sur - Autopista Sur	Bus	15.0	9.9
B8_ATN	Portal Norte - Autopista Norte	Bus	5.0	35.6
M0_C80	Portal 80 - Calle 80	Microbús	2.0	30.5
M1_ATS	Autopista Sur - Terminal	Microbús	4.5	21.0
M1_C13	Calle 13 - Terminal	Microbús	7.5	33.0
M1_C80	Calle 80 - Terminal	Microbús	6.0	40.0
M1_CAL	Calera - Terminal	Microbús	15.0	25.9
M1_CHO	Choachí - Avenida Calle 6	Microbús	7.5	22.4
M1_COT	Cota - Avenida Boyacá	Microbús	4.5	10.8
M1_VCI	Villavicencio - Terminal	Microbús	2.0	33.2
M2_ATS	Terminal - Autopista Sur	Microbús	2.0	22.4
M2_C13	Terminal - Calle 13	Microbús	6.0	34.5
M2_C80	Terminal - Calle 80	Microbús	4.0	39.1
M2_CAL	Terminal - La Calera	Microbús	30.0	26.0
M2_CHO	Avenida Calle 6 - Choachí	Microbús	9.0	22.4
M2_COT	Avenida Boyacá - Cota	Microbús	5.5	10.8
M2_VCI	Terminal - Villavicencio	Microbús	4.5	34.6
M3_ATN	Autopista Norte - Terminal	Microbús	3.0	52.6
M3_ATS	Autopista Sur - Terminal del Sur	Microbús	4.0	9.9

Ruta Emme	Descripción	Vehículo	Intervalo (min)	Longitud (km)
M3_C13	Calle 13 - Zona Industrial	Microbús	1.0	35.4
M3_C80	Calle 80 - Terminal	Microbús	15.0	26.0
M3_CAL	Calera - Porciúncula	Microbús	4.0	17.1
M4_ATN	Terminal - Autopista Norte	Microbús	2.0	51.7
M4_ATS	Terminal del Sur - Autopista Sur	Microbús	2.0	9.9
M4_C13	Zona Industrial - Calle 13	Microbús	1.5	36.4
M4_C80	Terminal - Calle 80	Microbús	30.0	25.2
M4_CAL	Porciúncula - La Calera	Microbús	8.0	17.1
M5_ATN	Autopista Norte - Portal Norte	Microbús	1.0	31.8
M5_C80	Calle 80 - Portal 80	Microbús	4.0	17.0
M6_ATN	Portal Norte - Autopista Norte	Microbús	2.0	31.8
M6_C80	Portal 80 - Calle 80	Microbús	7.0	17.0
M7_ATN	Autopista Norte - Portal Norte	Microbús	2.5	35.6
M7_C80	Calle 80 - Portal 80	Microbús	3.0	30.9
M8_ATN	Portal Norte - Autopista Norte	Microbús	3.0	35.6
M8_C80	Portal 80 - Calle 80	Microbús	5.0	30.9
M9_C80	Calle 80 - Portal 80	Microbús	2.0	30.5
R1_SOA	Soacha - Calle 80	Microbús	0.5	46.2
R2_SOA	Soacha - Avenida Boyacá por Calle 80	Microbús	0.5	46.8
R3_SOA	Soacha - Palermo Calle 45	Microbús	1.0	44.3
R4_SOA	Soacha - Paloquemao	Microbús	2.0	39.4
R5_SOA	Soacha - Avenida 1 Mayo	Microbús	0.5	43.0
R6_SOA	Soacha - Abastos	Microbús	0.5	44.8

*Fuente: Elaboración propia*

Los intervalos de paso de los servicios urbanos de las tipologías troncales, pretroncales, alimentación y SITP se definieron a partir de la simulación de la demanda sin restricción de la capacidad de ruta, los valores se ajustaron por medio de 2 iteraciones con el fin de suplir la carga máxima de cada una de las rutas. La asignación de la demanda sobre la red de oferta, permite evidenciar el uso del sistema troncal y complementario de manera independiente. La

**Figura 3-32** presenta el perfil de carga sobre la red de transporte público de la ciudad durante el periodo pico de la mañana.

**Figura 3-32:** Asignación del Modelo de Transporte Público.

*Fuente: Elaboración propia*

El procesamiento de la información resultante del modelo de transporte público permitió calcular los intervalos y otros indicadores operativos de las rutas urbanas, la Tabla 3-5 presenta para cada tipología de servicio los valores estimados para el intervalo medio, la cantidad de servicios y la flota para la operación del pico de la mañana. Como variable de entrada para la obtención de la información se definió una capacidad de carga por tipología vehicular así: bus estándar 60 pasajeros, bus biarticulado 220 pasajeros, bus articulado 150 pasajeros, bus padrón 70 pasajeros y bus alimentador 60 pasajeros.

**Tabla 3-5:** Resumen Indicadores Operacionales Servicios Urbanos [14].

Servicio	Tipo Vehículo	Servicios	Intervalo Medio (min)	Flota Estimada Vehículos
SITP	Bus Estándar	695	7.6	9,061
Troncal	Bus Biarticulado	10	5.2	330
	Bus Articulado	119	7.5	1,524
	Bus Padrón	12	9.5	251
	Alimentador	102	10.2	1,103

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.3.3 Precarga Asociada a la Operación del Transporte Público

Con base en la oferta de transporte público sobre cada uno de los arcos del sistema y aplicando el factor de equivalencia, se estimó la precarga asociada al transporte público en autos equivalentes, la Figura 3-33 presenta los valores de precarga obtenidos. Se puede observar que corredores como la Avenida Ciudad de Cali, la Avenida Boyacá, la Avenida Carrera 68, la Calle 13, la Avenida 1 de Mayo y la Carrera 7 presentan precargas importantes que se asocian al transporte público.

**Figura 3-33:** Precarga Asociada a la Operación del Transporte Público.



*Fuente: Elaboración propia*

Para los corredores más representativos, se estimó la tasa de uso asociada al transporte público en relación a su capacidad, los principales resultados son: Avenida Ciudad de Cali (19%), la Avenida Boyacá (24%), la Avenida Carrera 68 (29%), la Calle 13 (23%), la Avenida 1 de Mayo (25%) y la Carrera 7 (13%).

## 3.4 Marco de Asignación

La macro de asignación se estructuró considerando una interacción importante con archivos externos que tiene por finalidad hacer énfasis en los atributos que se deben

actualizar durante la simulación de nuevos escenarios. La metodología de asignación se plasma en las macros de asignación. La macro general de asignación (llama\_asignacion) cuenta con un total de 64 líneas que se presentan en Figura 3-34. Se realizó un esfuerzo por estructurar la macro usando la menor cantidad de subprocesos (macros internas) a nivel interno, las cuales presentan una versatilidad para su uso.

**Figura 3-34:** 59 Macro General de Asignación del Modelo de Transporte.

```
Línea 1  ~/******  
Línea 2  ~/ Restablece Matrices del Año de Asignación  
Línea 3  ~/******  
Línea 4  ~<delmat 1 7  
Línea 5  ~/******  
Línea 6  ~/ Carga Matrices de Demanda del Año de Asignación  
Línea 7  ~/******  
Línea 8  ~<leemat %1%  
Línea 9  ~/******  
Línea 10 ~/ Transformación a Matrices Vehiculares Equivalentes de Automóviles  
Línea 11 ~/******  
Línea 12 ~<seg_estrato 11 12 13 14 1  
Línea 13 ~<divmat 21 11 mo1  
Línea 14 ~<divmat 22 12 mo1  
Línea 15 ~<divmat 23 13 mo1  
Línea 16 ~<divmat 24 14 mo1  
Línea 17 ~<suma4 10 21 22 23 24  
Línea 18 ~<divmat 25 2 mo1  
Línea 19 ~<multimat 26 3 2.0  
Línea 20 ~<multimat 27 4 2.5  
Línea 21 ~<multimat 28 5 0.3  
Línea 22 ~<seg_estrato 15 16 17 18 6  
Línea 23 ~<divmat 29 15 1.35  
Línea 24 ~<divmat 30 16 1.35  
Línea 25 ~<divmat 31 17 1.35  
Línea 26 ~<divmat 32 18 1.35  
Línea 27 ~<copymat 33 7  
Línea 28 ~/******  
Línea 29 ~/ Preparacion de Componentes de Red  
Línea 30 ~/******  
Línea 31 ~<cargaatri vefl Veflau_%2%  
Línea 32 ~<cargaatri cacar Capcar_%2%  
Línea 33 ~<cargacuota cuau 3 Cuota_%2%  
Línea 34 ~<cargacuota cucp 4 Cuota_%2%  
Línea 35 ~<cargacuota cucg 5 Cuota_%2%  
Línea 36 ~<funciones  
Línea 37 ~<actcap  
Línea 38 ~/******  
Línea 39 ~/ Asignacion de Precargas
```

```

Línea 40  ~/******
Línea 41  ~<voleq_tp
Línea 42  ~<voleq @voltp
Línea 43  ~<asimult2 k cp 0.0067 vcpeq 26 h cg 0.0045 vcgeq 27
Línea 44  ~<voleq @voltp+ @vcpeq+ @vcgeq
Línea 45  ~<iniatri volcp
Línea 46  ~<volcp
Línea 47  ~<iniatri volcg
Línea 48  ~<volcg
Línea 49  ~/******
Línea 50  ~/ Asignacion de Automoviles-Taxis y Motos
Línea 51  ~/******
Línea 52  ~<asimult11_cg c au 0.0179 va12 21 0.0126 va3 22 0.0105 va4 23 0.0095
va56 24 0.0077 vaui 25 c au vto12 29 vto3 30 vto4 31 vto56 32 0.0126 voltx 33 vmteq 28
Línea 53  ~<timau
Línea 54  ~<vel
Línea 55  ~<iniatri vauu
Línea 56  ~<vauu
Línea 57  ~<iniatri vau
Línea 58  ~<vau
Línea 59  ~<iniatri volto
Línea 60  ~<volto
Línea 61  ~<iniatri vtx
Línea 62  ~<vtx
Línea 63  ~<iniatri volmt
Línea 64  ~<volmt
Línea 65  ~<asig_tiempos

```

*Fuente: Elaboración propia*

Cada una de las líneas de la macro que no se encuentran asociadas a comentarios se explica en los siguientes párrafos.

#### **Atributos para Definir en la Macro:**

%1%: Dos últimos dígitos de año de asignación “15”.

%2%: Escenario evaluado para este caso “base”.

**Línea 4 (~<delmat 1 7):** La macro **delmat** elimina las matrices mf del rango 1 a 7. Las cuales se describen así: mf1 matriz total de viajes de pasajeros del sistema del modo autos del segmento urbano, mf2 matriz de pasajeros en autos del segmento - suburbano, mf3 matriz de viajes vehiculares de camiones pequeños, mf4 matriz de viajes vehiculares en camiones grandes, mf5 matriz de viajes vehiculares en motocicleta, mf6 matriz de viajes de pasajeros en taxis ocupados, mf7 matriz de viajes vehiculares de taxis vacíos.

**Línea 8 (~<leemat %1%):** La macro **leemat** carga las matrices mf1, mf2, mf3, mf4, mf5, mf6 y mf7, las mismas deben estar definidas en el database en formato de entrada de matrices en un archivo con nombre “Mat\_20%1%.txt”.

**Línea 12 (~<seg\_estrato 11 12 13 14 1):** La macro **seg\_estrato** segmenta la matriz mf1 para las porciones de demanda de viajes en vehículo particular urbanos, de ésta manera crea mf11 como la matriz de viajes estrato 1-2, mf12 como la matriz de viajes estrato 3, la mf13 como la matriz de viajes estrato 4 y la mf14 como la matriz de viajes de estrato 5-6. Esto se logra con la definición de arreglos por segmento (gd1, gd2, gd3 y gd4 que corresponde a los grupos de estratos respectivamente).

**Líneas 13, 14, 15, 16 y 18 (~<divmat Argumento1 Argumento2 mo1):** La macro **divmat** divide la matriz definida en el argumento 2 en el vector de ocupación de la zona de origen cargado en mo1, de esta manera se generan las matrices de viajes vehiculares mf21, mf22, mf23, mf24 y mf25, las cuales corresponden a las matrices vehiculares de los segmentos estrato 1-2, estrato 3, estrato 4, estrato 5-6 y segmento suburbano en su mismo orden.

**Línea 17 (~<suma4 10 21 22 23 24):** La macro **suma4** guarda en la mf10 la suma de las matrices vehiculares de los viajes urbanos, de esta manera mf10 se hace igual a la suma de mf21, mf22, mf23 y mf24.

**Línea 19, 20 y 21 (~<multimat Argumento1 Argumento2 Argumento3):** La macro **multimat** toma las matrices de viajes vehiculares definidas en el argumento 2 (mf3: camiones pequeños, mf4: camiones grandes y mf5: motocicletas), la multiplica por el factor de equivalencia a automóviles argumento 3 (2.0 para camiones pequeños, 2.5 para camiones grandes y 0.3 para motocicletas) obteniéndose las matrices de viajes vehiculares equivalentes a autos para los modos cada modo, estas últimas se guardan de acuerdo con lo definido en el argumento 1 como: mf26 viajes vehiculares equivalentes a auto de camiones pequeños, mf27 viajes vehiculares equivalentes a auto de camiones grandes y mf28 viajes vehiculares equivalentes a auto de motocicletas.

**Línea 22 (~<seg\_estrato 15 16 17 18 6):** La macro **seg\_estrato** segmenta la matriz mf6 para las porciones de demanda de viajes en taxi, de ésta manera crea mf15 como la matriz de viajes estrato 1-2, mf16 como la matriz de viajes estrato 3, la mf17 como la matriz de

viajes estrato 4 y la mf18 como la matriz de viajes de estrato 5-6. Esto se logra con la definición de arreglos por segmento (gd1, gd2, gd3 y gd4 que corresponde a los grupos de estratos respectivamente).

**Líneas 23, 24, 25 y 26 (~<divmat Argumento1 Argumento2 1.35):** La macro **divmat** divide la matriz definida en el argumento 2 en el escalar de ocupación de taxis, de ésta manera se generan las matrices de viajes vehiculares mf29, mf30, mf31 y mf32, las cuales corresponden a las matrices vehiculares de taxis de los segmentos estrato 1-2, estrato 3, estrato 4 y estrato 5-6.

**Línea 27 (~<copymat 33 7):** La macro **copymat** se encarga de copiar la matriz mf7 (matriz de viajes vehiculares de taxis vacíos) en la matriz mf33, completando de ésta manera el rango de matrices mf21 a mf33, las cuales contienen como ya se mencionó los viajes vehiculares equivalentes a autos de los modos simulados.

**Línea 31 y 32 (~<cargaatri Argumento1 Argumento2):** La macro **cargaatri** tiene por objetivo cargar atributos al banco de datos necesarios para la asignación en el @"elargumento1" a partir del archivo de texto definido por medio del argumento2. Mientras en la línea 31 carga la velocidad a flujo libre en @velfl, la línea 32 carga la capacidad por carril en @cacar. La estructura de los archivos de entrada debe ser consistente con el módulo de Emme "input attribute using catch entry".

**Línea 33, 34 y 35 (~<cargacuota Argumento1 Argumento2 Argumento3):** La macro **cargacuota** lee las tarifas de peaje de la columna que define el segundo argumento, lo anterior para un archivo de texto que se define con base en el argumento 3, el valor leído es guardado en @"argumento1". Según lo anterior el archivo cuota\_base.txt debe tener la estructura i j tarifa\_autos tarifa\_camiones\_pequeños tarifa\_camiones grandes, guardándose los valores en los atributos @cuau, @cucp y @cucg.

**Línea 36 (~<funciones):** la macro **funciones** carga las funciones asociadas al tránsito de los flujos sobre la red de transporte, leyéndolas del archivo "funciones.txt", claramente el archivo de entrada debe tener el formato definido para el módulo de Emme "Input functions using catch entre".

**Línea 37 (~<actcap):** La macro **actcap** calcula la capacidad por sentido de cada uno de los arcos mediante la multiplicación de los atributos @cacar y lanes, guardando el resultado en el atributo @casen (capacidad por sentido).

**Línea 41 (~<voleq\_tp):** La macro **voleq\_tp** luego de inicializar el atributo @voltp (volumen de vehículos de transporte público en autos equivalentes) la macro estima la precarga asociada al tránsito de vehículos de transporte público, esto lo realiza considerando la frecuencia de las rutas y el factor de equivalencia de los diferentes tipos de vehículos, y guarda los valores en @voltp.

**Línea 42 y 44 (~<voleq @voltp):** La macro **voleq** guarda en el atributo @voleq (Volumen de precarga equivalente autos) lo definido en el argumento1. De esta manera mientras en la línea 42 guarda temporalmente la precarga del transporte público como variable de entrada para la asignación de camiones, la línea 44 guarda en @voleq las precargas que además de transporte público incorporan los camiones grandes y los camiones pequeños.

**Línea 43 (~<asimult2 k cp 0.0067 vcpeq 26 h cg 0.0045 vcgeq 27):** La macro **asimult2** realiza una asignación multiclase para las 2 matrices de autos equivalentes que definen los camiones (camiones pequeños y camiones grandes), el primer segmento de los argumentos define los parámetros de la asignación de camiones grandes así: argumento1- modo **k**, argumento2-cuotas cargadas en @cucp, argumento3 inverso del VOT para camiones pequeños (**0.0067**), el argumento4 define el atributo donde se guardan los volúmenes de asignación @vcpeq, el argumento5 la matriz asignada mf**26**. De manera análoga se definen los parámetros de la asignación de camiones grandes (argumentos 6 a 10).

**Línea 45, 47, 55, 57, 59, 61 y 63 (~<iniatri Argumento1):** La macro **iniatri** inicializa o hace cero los valores guardados en los atributos definidos por el argumento1. Según lo anterior las líneas 45, 47, 55, 57, 59, 61 y 63, hacen cero los atributos @volcp (volumen total camiones pequeños), @volcg (volumen total camiones grandes) y @vauu (volumen total de autos urbanos), @vau (volumen total de autos), @volto (volumen total de taxis ocupados), @vtx (volumen total de taxis) y @volmt (volumen total de motocicletas).

**Línea 52 (~<asimult11\_cg c au 0.0179 va12 21 0.0126 va3 22 0.0105 va4 23 0.0095 va56 24 0.0077 vaui 25 c au vto12 29 vto3 30 vto4 31 vto56 32 0.0126 voltx 33 vmteq 28):** La macro **asimult11** realiza una asignación multiclase para las 11 matrices de autos equivalentes (21, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33 y 28) con los VOT e impedancias asociadas a cada caso. Definiendo las salidas así: @va12 (volumen de autos equivalentes estrato 1-2), @va3 (volumen de autos equivalentes matriz estrato 3), @va4 (volumen de autos equivalentes matriz estrato 4), @va56 (volumen de autos equivalentes matriz estrato 5-6), @vaui (volumen de autos suburbanos equivalentes), @vto12 (volumen de autos equivalentes matriz taxis ocupados estrato 1-2), @vto3 (volumen de autos equivalentes matriz taxis ocupados estrato 3), @vto4 (volumen de autos equivalentes matriz taxis ocupados estrato 4), @vto56 (volumen de autos equivalentes matriz taxis ocupados estrato 5-6), @voltx (volumen de autos equivalentes matriz taxis vacíos) y @vmteq (volumen de autos equivalentes matriz motocicletas).

**Línea 53 (~<timau):** La macro **timau** luego de inicializar el atributo @timau (tiempo de recorrido del arco) la macro asigna el valor del tiempo de medio de tránsito sobre el arco resultante de la asignación del modelo de transporte (timau).

**Línea 54 (~<vel):** La macro **vel** inicializa el atributo @vel (velocidad de recorrido del arco) y posteriormente estima la velocidad como la relación entre la longitud (len) y @timau.

**Línea 56 (~<vauu):** La macro **vauu** define el atributo @vauu (volumen total de autos tránsito urbano) como la suma de los atributos @vae12, @va3, @va4 y @va56.

**Línea 58 (~<vau):** La macro **vau** define el atributo @vau (Volumen total de autos) como la suma de los atributos @vauu y @vaui.

**Línea 60 (~<volto):** La macro **volto** define el atributo @volto (volumen total de taxis ocupados) como la suma de los atributos @vto12, @vto3, @vto4 y @vto56.

**Línea 62 (~<vtx):** La macro **vtx** definen el atributo @vtx (volumen total de taxis) como la suma de @volto y @voltx.

**Línea 64 (~<volmt):** La macro **volmt** definen el atributo @volmt (volumen total de motocicletas) como @vmteq/0.3.

### **3.5 Calibración del Modelo de Transporte**

La reproducción de los volúmenes vehiculares observados en campo y los tiempos de viaje de los usuarios del modo de transporte definieron la calibración del modelo. Como parte del estudio se calibró la asignación de cada uno de los modos de transporte: automóviles, taxis, motocicletas, camiones pequeños y camiones grandes. Como se mencionó en la metodología, para este proceso se contó con volúmenes de control distribuidos espacialmente sobre arcos estratégicos de la red de transporte que permitieron la representación de pantallas ideales para la adecuada calibración del modelo.

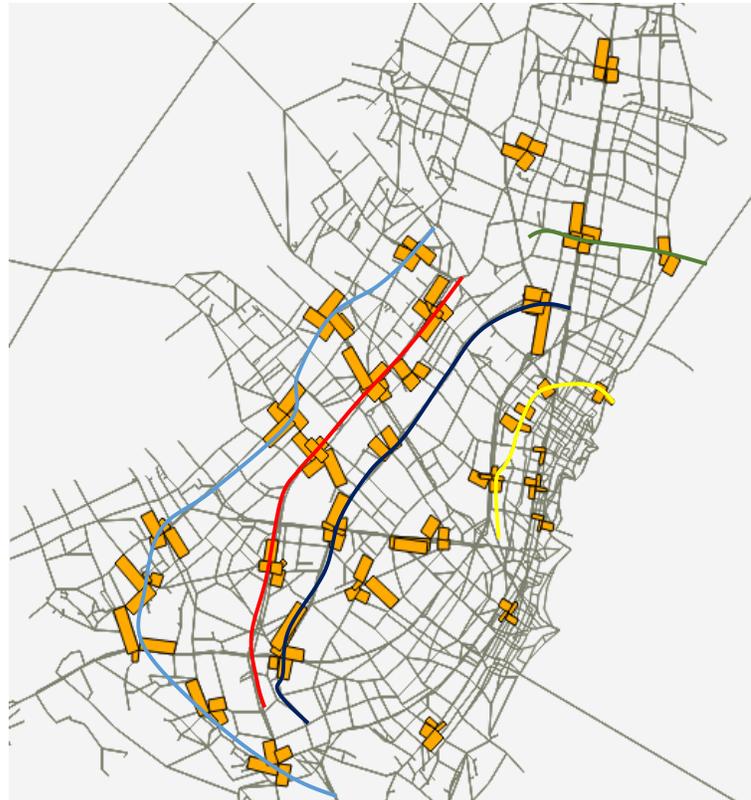
Se pueden definir 3 estados de avance de la calibración del modelo que valen la pena presentar aun cuando 2 de los estados son parciales: una asignación inicial sobre la red de oferta actualizada, una asignación con ajuste de velocidades y una última asignación con ajuste de matrices que corresponde al modelo calibrado.

#### **3.5.1 Volúmenes de Calibración**

A partir de las bases de datos resultantes de los estudios de conteos vehiculares realizados en el 2015 como parte del desarrollo del estudio de monitoreo (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015), se definieron los volúmenes de calibración del modelo de transporte desarrollado para el periodo pico de la mañana de un día hábil típico (6:00 – 7:00).

En la Figura 3-35 se puede observar la localización geográfica sobre la red vial de los 136 puntos de control que se usaron para la calibración de los modelos de automóviles, taxis y motocicletas. Se ilustra de igual manera las pantallas definidas para la calibración de estos segmentos de la demanda. Los controles se definieron en el modelo para estas tipologías vehiculares como @afau, @aftx y @afmt para automóviles, taxis y motocicletas.

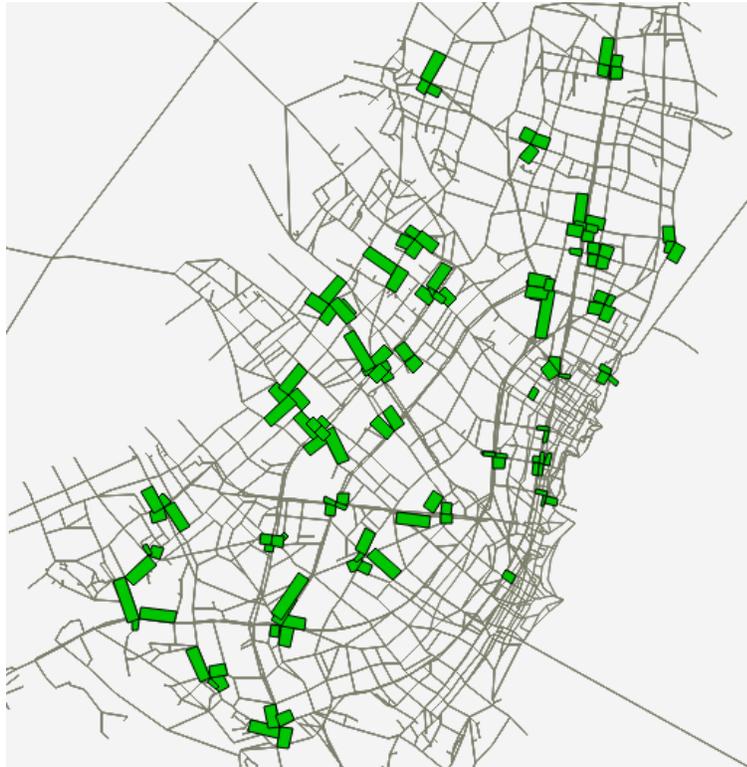
**Figura 3-35:** Puntos de Control Calibración de Automóviles, Taxis y Motocicletas.



*Fuente: Elaboración propia*

Análogamente se presenta en la Figura 3-36 la distribución de los 133 aforos que se constituyeron en controles para la calibración de la matriz de camiones pequeños. Estos controles son definidos en el modelo como el atributo de usuario @afcp.

**Figura 3-36:** Puntos de Control Calibración de Camiones Pequeños.



*Fuente: Elaboración propia*

Los controles para calibrar el modelo de camiones grandes se presentan en la Figura 3-37, en total se definieron 57 puntos de control para la calibración de esta tipología vehicular. Los volúmenes de calibración se definieron el modelo como @afcg.

**Figura 3-37:** Puntos de Control Calibración de Camiones Grandes.



*Fuente: Elaboración propia*

### 3.5.2 Asignación del Modelo e Indicadores de Bondad de la Calibración

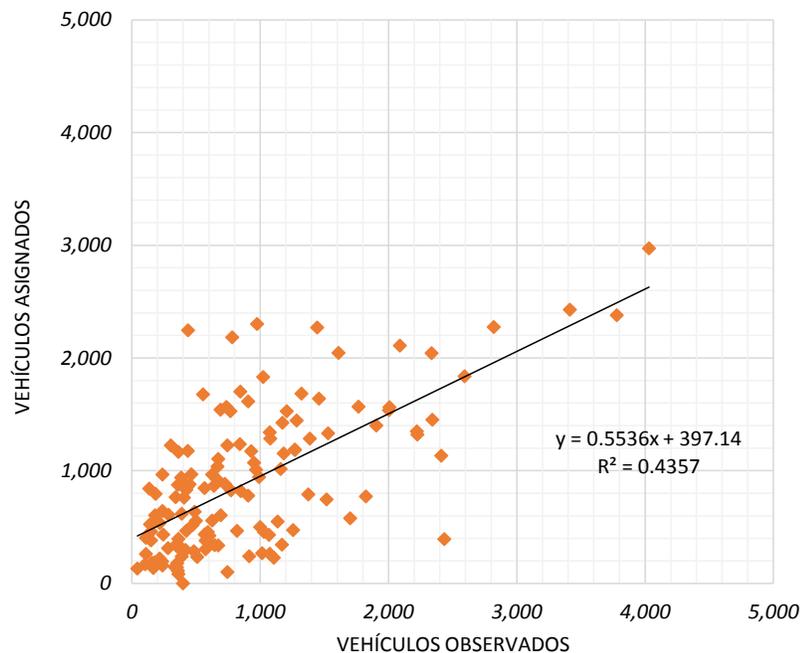
Una vez se contó con la red caracterizada se realizó una primera asignación la cual presentó indicadores de bondad deficientes que luego de una revisión detallada de los procesos, permitieron concluir en la necesidad de reasignar las funciones de demora y para algunos corredores la velocidad a flujo libre. A lo largo del presente capítulo se presentan los resultados de la primera asignación, de la asignación con ajuste de funciones y la asignación que define la calibración final del modelo de transporte que incluye el ajuste de matrices.

#### 3.5.2.1 Asignación Inicial

La asignación inicial se realizó con las matrices semilla sobre la oferta actualizada para el año 2015, la Figura 3-38 presenta la dispersión de los flujos asignados vs. observados

para la hora pico de la mañana, por medio de una regresión lineal se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.44, asociado a una recta con pendiente de 0.55 y corte en y de 397, un escenario ideal estos valores deberían ser 1.0, 1.0 y 0.

**Figura 3-38:** Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Asignación Inicial.



*Fuente: Elaboración propia*

Además de analizar los resultados sobre el vehículo particular, se estudiaron los indicadores de calibración de los demás modos de transporte. Los resultados se analizaron a partir de las diferencias entre vehículos observados y simulados, considerando además el estadístico GEH y los estados de saturación de la red. Los análisis permitieron concluir en la necesidad de implementar cambios en habilitación de modos (mal definidos), la asignación de funciones de demora y velocidades a flujo libre.

### 3.5.2.2 Asignación con Ajuste de Velocidades

Una pequeña porción de las velocidades a flujo libre fueron modificadas sobre algunos corredores de la red de transporte que son consistentes con las características de la infraestructura, en menor proporción se modificaron funciones de demora y por último se

habilitaron modos de transporte en algunos arcos. Para lo anterior fue relevante el análisis de estrategias de caminos de viaje lógicos para los diferentes pares Origen-Destino (OD) y el análisis de tiempos de viaje y velocidades sobre la red. La Figura 3-39 presenta los arcos de la red que se modificaron en esta fase del estudio.

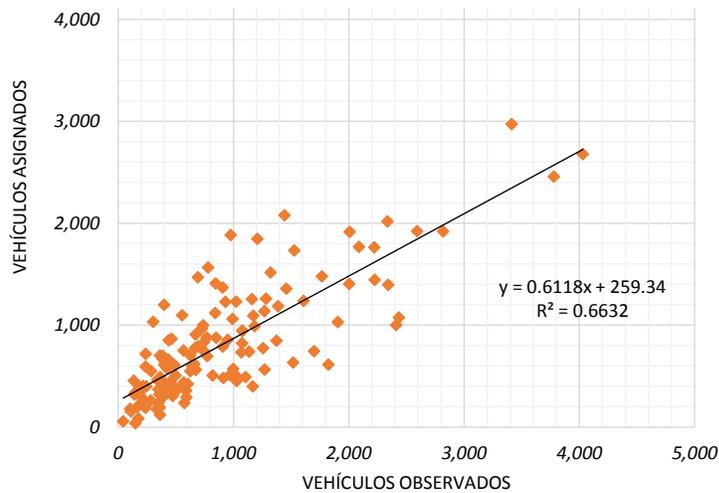
**Figura 3-39:** Red de Transporte Con Ajuste de Funciones.



*Fuente: Elaboración propia*

Implementados los cambios en la red de oferta hasta lograr el máximo nivel de representación de los volúmenes observados mediante el análisis de estrategias de caminos, se realizó la asignación sobre el nuevo escenario. La dispersión de volúmenes asignados y observados obtenida (para autos) mediante la asignación del escenario con ajuste de funciones se presenta en la Figura 3-40, es de resaltar el coeficiente de correlación que define la regresión lineal (0.66), en tanto se obtuvo una mejora importante con respecto al escenario anterior (0.44).

**Figura 3-40:** Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Asignación Con Ajuste de Funciones.



Fuente: *Elaboración propia*

### 3.5.2.3 Asignación Con Matrices Calibradas

Luego de aplicar el ajuste de submatrices definidos en la metodología de la calibración se obtuvo la asignación final del modelo del año 2015, el generar esta matriz consideró ajustes representados en más de 150 iteraciones con un tiempo medio para cada ajuste de 32 minutos. En la Figura 3-41 se enseña la asignación de vehículos particulares del sistema de transporte calibrado para el periodo pico de la mañana.

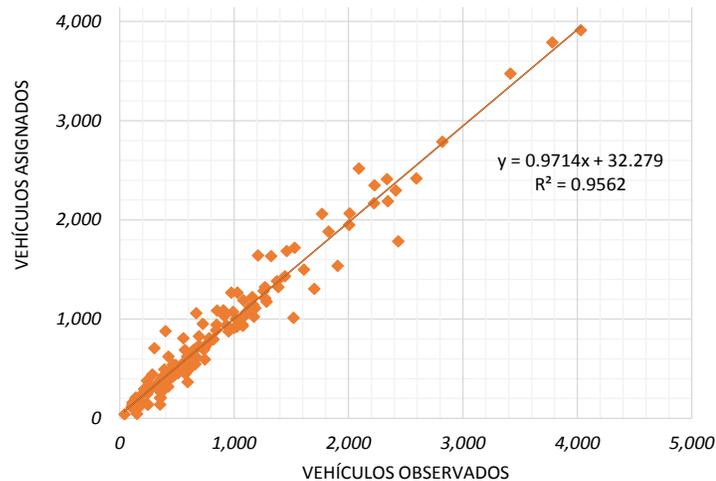
**Figura 3-41:** Asignación General de Automóviles – Modelo Calibrado.



Fuente: *Elaboración propia*

La Figura 3-42 presenta la dispersión de volúmenes observados y simulados para el segmento de vehículo particular. Se aprecia un coeficiente de correlación de 0.96.

**Figura 3-42:** Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.



*Fuente: Elaboración propia*

Finalizada la calibración del modelo se presenta en la Figura 3-43 la asignación de taxis sobre la red de transporte.

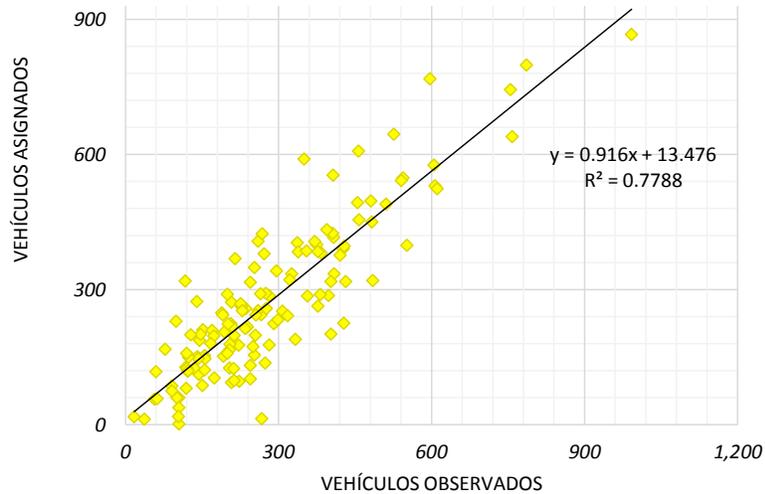
**Figura 3-43:** Asignación General de Taxis – Modelo Calibrado.



*Fuente: Elaboración propia*

La dispersión lograda para los taxis por medio del ajuste de matrices se presenta en la Figura 3-44, como se aprecia la regresión lineal presenta una pendiente de 0.92 y un corte con el eje vertical de 13.

**Figura 3-44:** Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.



*Fuente: Elaboración propia*

Análogamente en la Figura 3-45 se presenta la asignación final de las motocicletas sobre la red de transporte.

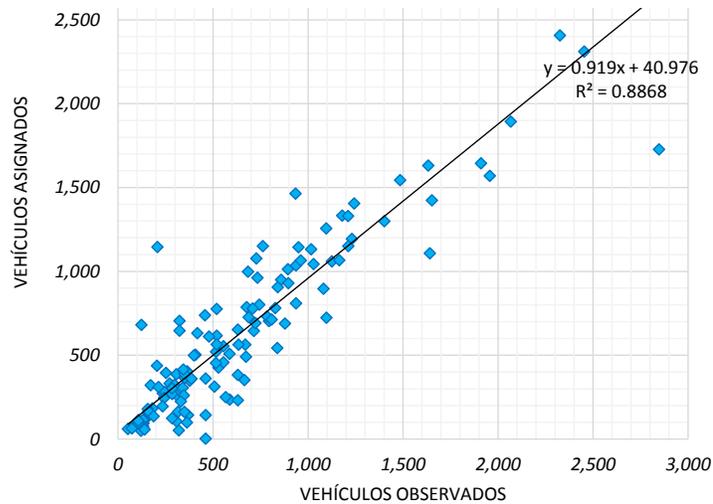
**Figura 3-45:** Asignación General de Motocicletas – Modelo Calibrado.



*Fuente: Elaboración propia*

La dispersión de volúmenes calibrados y asignados asociadas al modo motocicletas se presenta en la Figura 3-46, es importante destacar una correlación final de 0.89

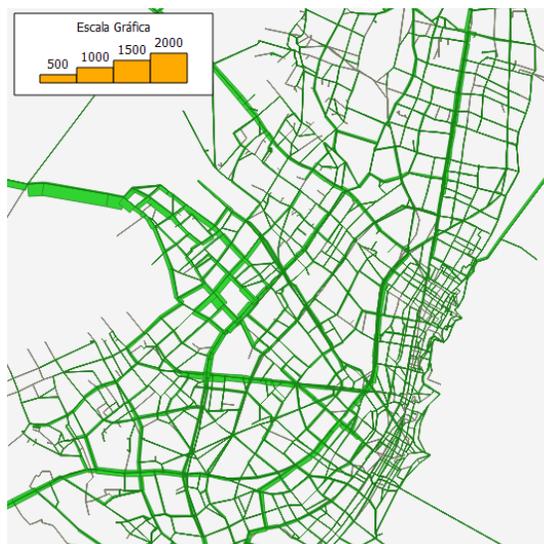
**Figura 3-46:** Dispersión del Volumen de Motocicletas Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.



*Fuente: Elaboración propia*

La asignación de los vehículos de carga pequeños para el periodo pico de la mañana se presenta en la Figura 3-47.

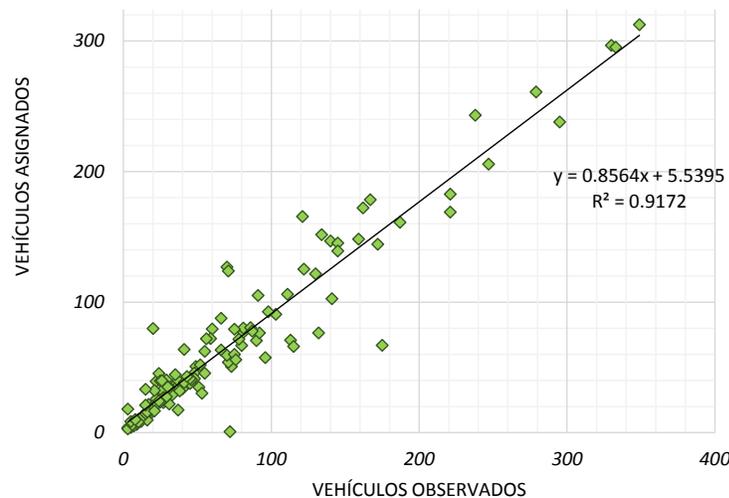
**Figura 3-47:** Asignación General de Camiones Pequeños – Modelo Calibrado.



*Fuente: Elaboración propia*

Luego del ajuste realizado a las matrices se obtuvo una correlación entre vehículos observados y simulados de 0.92, lo anterior se puede apreciar en la Figura 3-48.

**Figura 3-48:** Dispersión del Volumen de Camiones Pequeños Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.



*Fuente: Elaboración propia*

El último segmento correspondiente a camiones grandes los cuales muestran una asignación consistente con la reglamentación del tránsito de esta categoría vehicular, la asignación se muestra en la Figura 3-49.

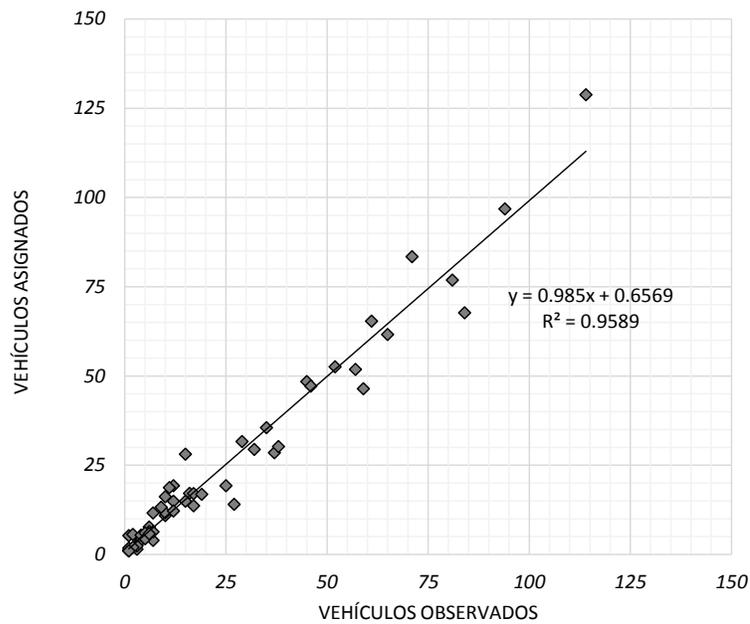
**Figura 3-49:** Asignación General de Camiones Grandes – Modelo Calibrado.



Fuente: Elaboración propia

El coeficiente de correlación obtenido para la simulación de camiones grandes es de 0.96, la Figura 3-50 presenta la asignación y la regresión lineal de los vehículos observados y simulados.

**Figura 3-50:** Dispersión del Volumen de Camiones Grandes Asignados Vs. Observados en los Puntos de Control – Modelo Calibrado.



Fuente: Elaboración propia

### 3.5.3 Indicadores de Bondad de la Calibración

El resultado de los indicadores generales de bondad para cada modo de transporte calibrado se presenta para cada control en el capítulo 7.1, en el siguiente orden: automóviles, taxis, motocicletas, camiones pequeños y camiones grandes, los campos asociados a las tablas presentadas se describen a continuación:

- • **Nodo i:** Identificador de Emme del nodo inicial del tramo con control.
- • **Nodo j:** Identificador de Emme del nodo final del tramo con control.
- • **Aforados:** Volumen aforado en el tramo i j durante el periodo modelado.
- • **Asignados:** Volumen simulado en el tramo i j.
- • **Diferencia (Asignados-Aforados):** Resta entre volúmenes asignados y aforados.
- • **Relación (Asignados/Aforados):** División entre volúmenes asignados y aforados.
- **GEH:** Estadístico GEH para volúmenes asignados y aforados.

### 3.5.4 Matrices Calibradas

Los ajustes por conteos permitieron ajustar cada uno de los modos simulados, para la totalidad de los segmentos en la Tabla 3-6 se presentan las dimensiones de las matrices calibradas, si bien los ajustes se realizaron para las matrices vehiculares, los datos se estimaron en las demás unidades (viajes personales y equivalentes).

**Tabla 3-6:** Dimensiones de las Matrices Calibradas [14].

Modo de Transporte	Segmentos	Dimensión de Viajes		
		Unipersonales	Vehiculares	Vehiculares Equivalentes
Vehículo Particular	Urbanos, Estrato 1-2	41,419	23,613	23,613
	Urbanos, Estrato 3	112,036	67,964	67,964
	Urbanos, Estrato 4	48,909	30,912	30,912
	Urbanos, Estrato 5-6	41,892	27,084	27,084
	suburbanos	19,202	11,169	11,169
Subtotal Vehículo Particular		263,458	160,742	160,742
Taxi	Taxi Ocupados	45,742	27,824	27,824
	Taxi Vacíos	N.A.	16,565	16,565
Subtotal Taxi		45,742	44,389	44,389
Motocicleta	Motocicleta	Sin Registro	80,484	24,145
Subtotal Taxi		Sin Registro	80,484	24,145

<b>Camiones</b>	<b>Camiones Pequeños</b>	N.A.	8,700	14,700
	<b>Camiones Grandes</b>	N.A.	821	2,053
<b>Total</b>		<b>N.A.</b>	<b>9,521</b>	<b>19,453</b>

*Fuente: Elaboración propia*

## 3.6 Calibración del Modelo de Transporte

Los resultados de los análisis de sensibilidad desarrollados para las funciones de demora, el valor subjetivo del tiempo y las precargas asociadas al transporte público se presentan a lo largo de este capítulo.

### 3.6.1 Funciones Flujo – Demora

Como se explicó anteriormente el análisis de sensibilidad ante cambios en la funciones de demora, se desarrolla para el tramo de la Avenida Boyacá comprendido entre la Calle 80 y Calle 63, tomando como referencia del estudio “Funciones Volumen – Demora BPR y Cónica en vías multicarriles de Bogotá – UPTC” la función de flujo que mejor se ajusta tanto a carriles internos como externos que corresponden a la función BPR (Márquez et al., 2014). El tramo analizado se presenta en la

Figura 3-51.

**Ecuación 3-1** Función de Demora Tipo BPR

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

*Fuente: Tomado de Estudio de Funciones Volumen – Demora BPR y Cónica en Vías multicarriles de Bogotá – UPTC (Márquez et al., 2014).*

Donde:

t = tiempo de tránsito en el arco.

t<sub>0</sub> = tiempo de tránsito a flujo libre.

v = flujo sobre el arco.

c = capacidad.

1,425 veh/h/carril calzada interna y 1,330 veh/h/carril para la calzada externa.

α = Parámetro 1 de calibración.

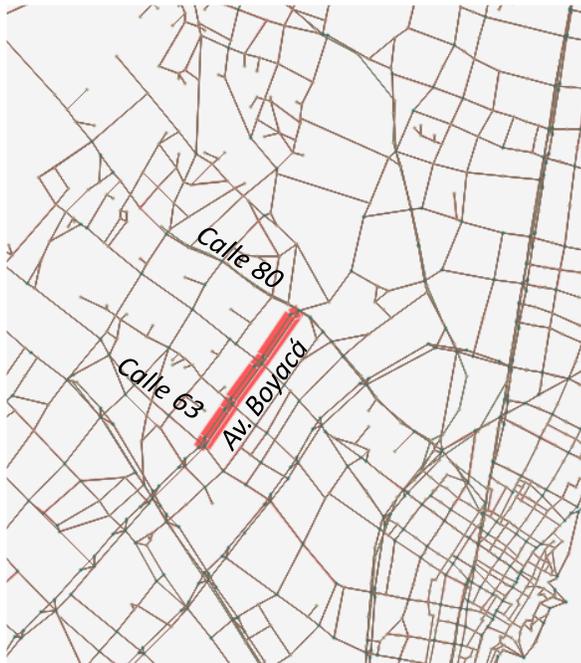
Sentido Sur-Norte: 0.497 calzada interna y 0.915 para la calzada externa.

Sentido Norte-Sur: 0.471 calzada interna y 0.761 para la calzada externa.

β = Parámetro 2 de calibración.

Sentido Sur-Norte: 2.384 calzada interna y 3.101 para la calzada externa.

Sentido Norte-Sur: 2.285 calzada interna y 3.143 para la calzada externa.

**Figura 3-51:** Tramo de la Avenida Boyacá Objeto de Análisis.

*Fuente: Elaboración propia*

Una vez realizada la asignación del modelo de transporte se procesaron los resultados y compararon los indicadores de operación obtenidos en los escenarios de calibración y de sensibilidad. La Tabla 3-7 sintetiza los resultados obtenidos.

**Tabla 3-7:** Indicadores de Bondad Análisis de Sensibilidad de Funciones de Demora [14].

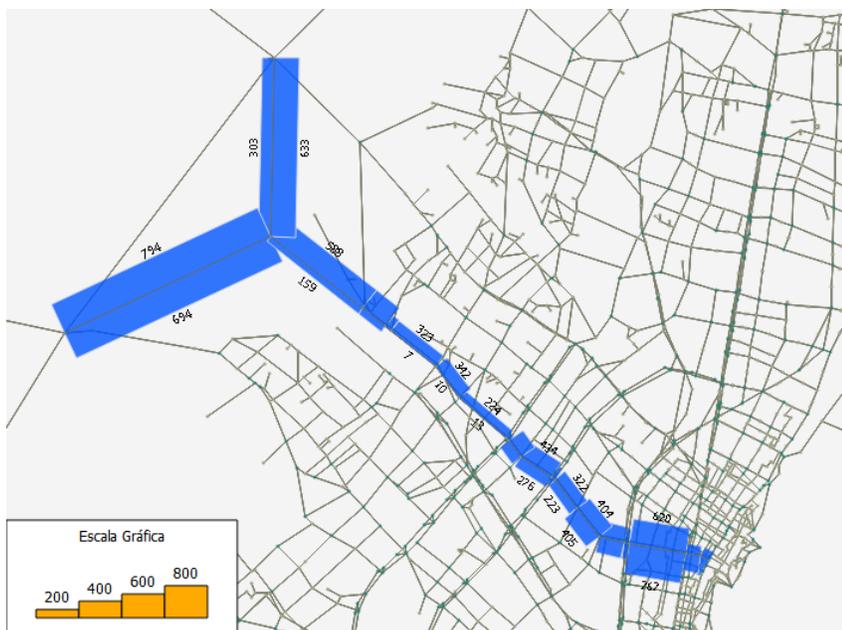
Datos Operativos	Calibrado	Simulado
Tiempo S-N (Interna)	14.1 min	11.7 min
Tiempo S-N (Externa)	15.6 min	12.4 min
Tiempo N-S (Interna)	14.1 min	12.6 min
Tiempo N-S (Externa)	11.3 min	10.4 min
Vel. S-N (Interna)	11.7 km/h	14.1 km/h
Vel. S-N (Externa)	10.8 km/h	13.5 km/h
Vel. N-S (Interna)	13 km/h	14.6 km/h
Vel. N-S (Externa)	14.8 km/h	16.2 km/h

*Fuente: Elaboración propia*

### 3.6.2 Valor Subjetivo del Tiempo

En el escenario de asignación con los VOT definidos para la calibración se captan un total de 1,851 usuarios, que recorren un total de 20,694 km (promedio de 11.18 km/usuario) y permiten el recaudo de \$7,133,539 durante el periodo pico de la mañana. La Figura 3-52 presenta la asignación del proyecto bajo las condiciones de VOT usados para la calibración. En el banco se define este escenario como 22015 (Análisis de Sensibilidad VOT - Base).

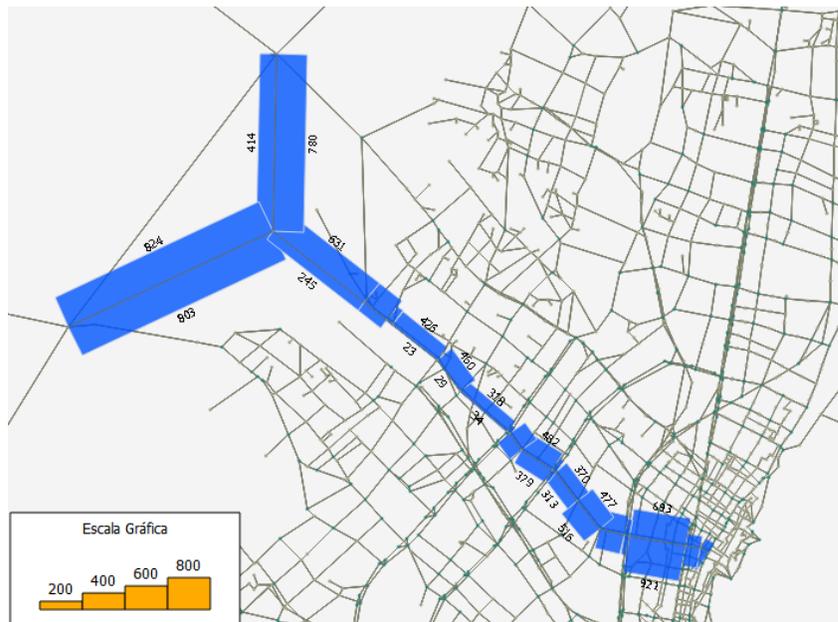
**Figura 3-52:** Asignación Autopista Regional de Occidente – VOTs de Calibración



*Fuente: Elaboración propia*

En contraste la asignación del proyecto que considera un aumento en los valores del tiempo de los usuarios del vehículo particular se presenta en la Figura 3-53. Bajo esta condición se captan un total de 2,176 usuarios, que recorren un total de 24,415 km (promedio de 11.22 km/usuario) y permiten el recaudo \$ 8,412,465 durante el periodo pico de la mañana. En el banco se define este escenario como 32015 (Análisis de Sensibilidad VOT - VOT x 1.15).

**Figura 3-53:** Asignación Autopista Regional de Occidente – VOTs de Sensibilidad



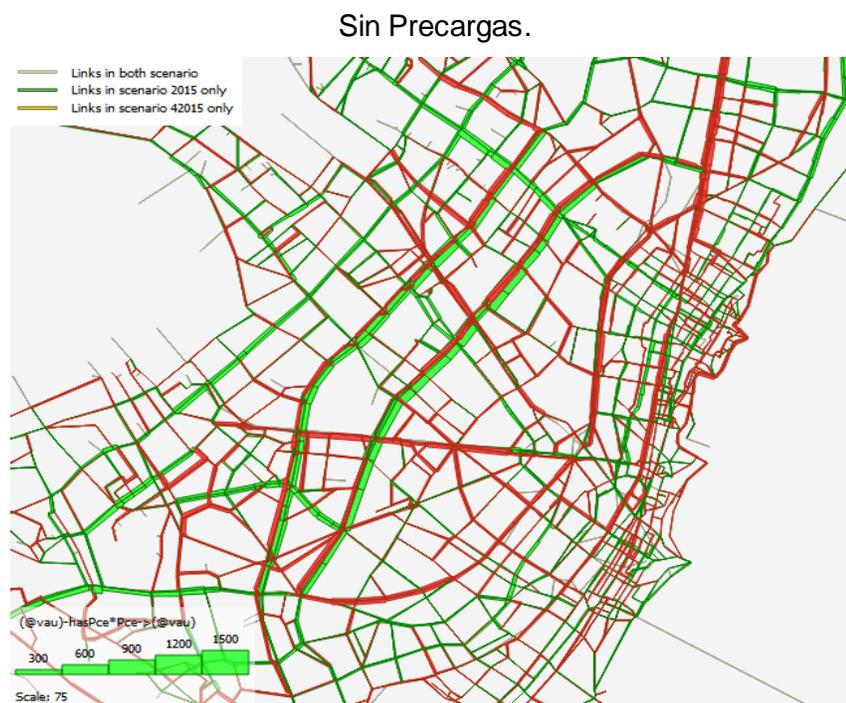
*Fuente: Elaboración propia*

Los resultados presentan variaciones considerables tanto en términos de usuarios, usos e ingresos del proyecto, que son consistentes con los cambios definidos. Obteniendo en el escenario de sensibilidad unos ingresos que son un 18% superiores con respecto al escenario de calibración.

### 3.6.3 Precargas Asociadas al Transporte Público

Se realizó la asignación del escenario que no considera las precargas del transporte público y se comparó la asignación con respecto al escenario calibrado. La Figura 3-54 presenta la comparación de volúmenes de automóviles para los dos escenarios (Escenario Calibrado – Escenario Sin Precargas), en verde se presentan ganancias y en rojo pérdidas, resaltándose pérdidas sobre las calzadas rápidas y ganancias en las calzadas lentas.

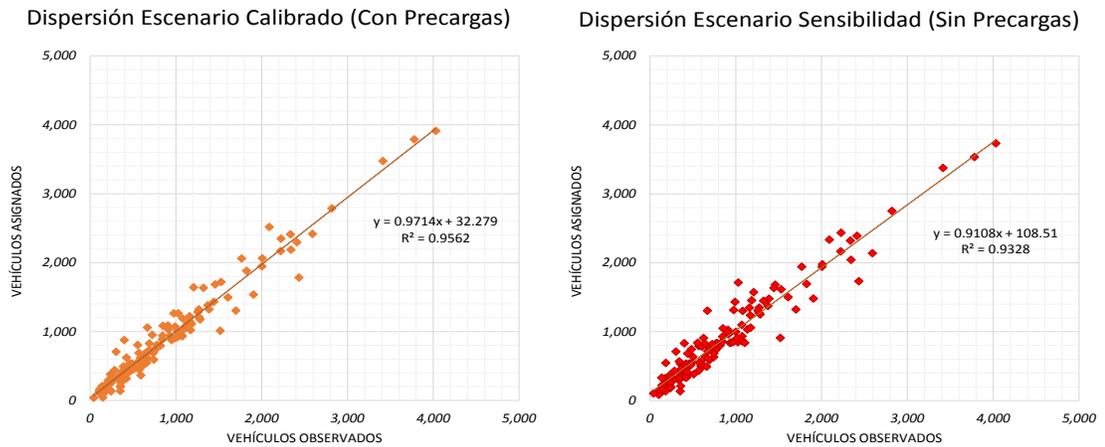
**Figura 3-54:** Comparación de Volumen de Automóviles Escenario Base Vs. Escenario



*Fuente: Elaboración propia*

Como se aprecia en la Figura 3-55 la no consideración de la precarga asociada a la operación del transporte público tiene un efecto importante en la bondad de la calibración del modelo, en tanto la correlación disminuye en 3 centésimas. Pasando de 0.96 a 0.93, la pendiente y el término independiente también se ven afectados.

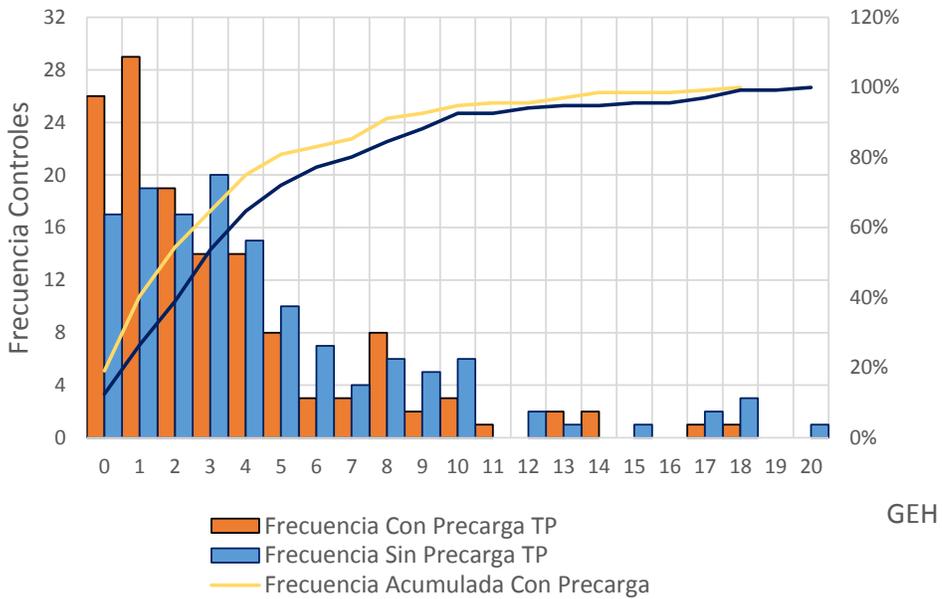
**Figura 3-55:** Comparación de Dispersión de Automóviles Escenario Base Vs. Escenario Sin Precargas.



Fuente: Elaboración propia

Mientras que en el escenario que considera precargas se tiene el 75% de los GEH menores a 5.0, para el escenario sin precargas este porcentaje desciende a 65%, esto muestra una sensibilidad importante del GEH ante la precarga para el modelo de Bogotá. En la Figura 3-56 se presentan el polígono de frecuencia y frecuencia relativa aculada que permite ilustrar la sensibilidad de los del GEH ante la consideración de la precarga del transporte público.

**Figura 3-56:** Ojivas Relativas del GEH Escenario Calibrado y Escenario Sin Precarga del Transporte Público.



Fuente: Elaboración propia

## 4. Discusión y Análisis de Resultados

Se consideraron 4 aspectos relevantes a lo largo del trabajo que son estratégicos como soporte al modelo de transporte o bien representan un tema importante de discusión: la definición del periodo pico, la bondad de la calibración, las matrices de viajes en automóvil obtenidas y los tiempos de viaje para el vehículo particular.

### 4.1 La Definición del Periodo Pico

La discusión del periodo matutino de mayor demanda se realizó mediante el análisis del comportamiento del sistema desde cuatro ópticas independientes asociadas a esta variable: en primer lugar se analizó la cantidad de viajes en desarrollo por parte de los usuarios del automóvil en cada periodo horario, el segundo análisis se hizo estimando los viajes en desarrollo a nivel sistema considerando todos los modos que interactúan en la red, el tercer análisis se enfocó en la afluencia de automóviles sobre la red de transporte, mientras que la consideración final se hizo con base en la afluencia de todas las categorías vehiculares en la red.

De acuerdo con lo descrito, la metodología permitió analizar el comportamiento temporal de la demanda asociada a los viajes personales y a los vehículos, lo anterior tanto a nivel de sistema como para el segmento del vehículo particular. Esto se logró a partir de información secundaria, haciéndose uso de la base de datos de las encuestas de movilidad en hogares del año 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015) y de la información de aforos vehiculares recopilada por medio del estudio de monitoreo durante el mismo año (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015).

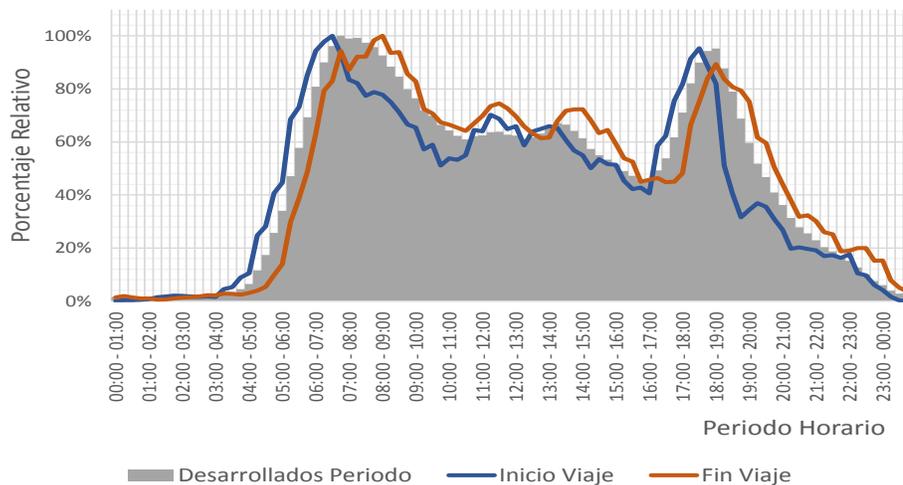
La estimación de viajes en desarrollo mediante vehículo particular, se realizó por medio de la base de hogares del módulo de viajes recopilado en la encuesta de movilidad de 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). Luego identificar los viajes con origen y/o destino en la ciudad de Bogotá, se extrajo el segmento de viajes desarrollados en día hábil típico y con modo prevaleciente automóvil; definido el momento de inicio y finalización de cada uno de los viajes de la sub-base, se marcaron los intervalos a nivel de 15 minutos en los cuales se desarrolla cada uno de los viajes. Los resultados se agruparon en periodos horarios considerando el factor de expansión definido para cada viaje, estimándose el

**periodo horario en el que se desarrollan la mayor cantidad de viajes en automóvil.**

De manera complementaria se estimaron la cantidad de viajes que inician y finalizan a nivel de intervalos de 15 minutos que posteriormente se agruparon a nivel horario. Al analizar el segmento que se asocia al vehículo particular, los perfiles de viajes en desarrollo en la red de transporte se obtiene un periodo pico entre las 6:30- 7:30.

Los resultados se sintetizan en la Figura 4-1 (en azul se presenta la proporción de viajes que inician en el periodo horario, en naranja la proporción de viajes que finaliza en cada periodo horario y en gris los viajes en desarrollo en cada periodo).

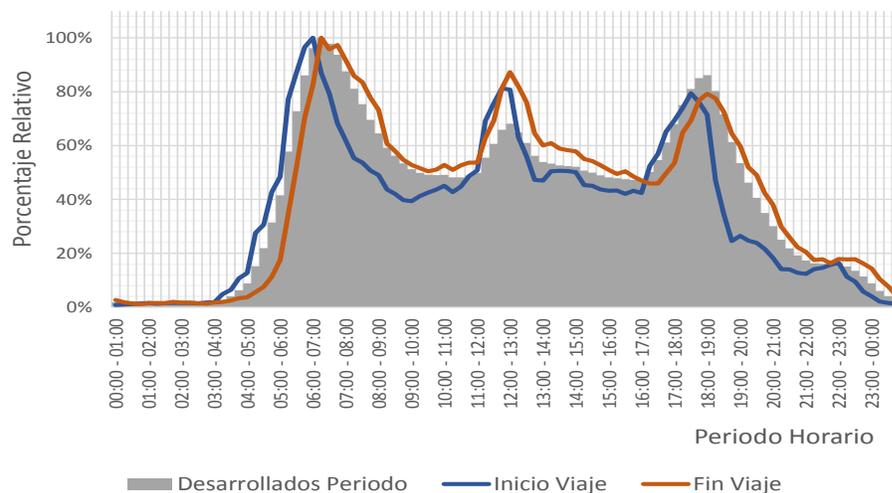
**Figura 4-1:** Perfil Horario de Viajes en Desarrollo Asociados a Bogotá – Análisis de Automóviles.



*Fuente: Elaboración propia a partir de la encuesta de movilidad 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

Para la estimación de **viajes en desarrollo en la red de transporte (todos los modos)** se aplicó la misma metodología referenciada anteriormente, con la excepción de que no se consideraron filtros asociados al modo de transporte, de esta manera se identificó el periodo horario en el que se desarrollan la mayor cantidad de viajes en el sistema de transporte. Esto se realizó a partir de la encuesta de movilidad 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). Como parte de este análisis se incluyeron los viajes asociados en origen y/o destino a la ciudad de Bogotá (viajes urbanos). En la Figura 4-2 se presenta el perfil para un día hábil típico de la cantidad de viajes urbanos en desarrollo durante cada periodo horario. Como muestran los análisis realizados la hora pico de la mañana de acuerdo a la cantidad de viajes en desarrollo se encuentra entre las 6:15 y las 7:15 horas.

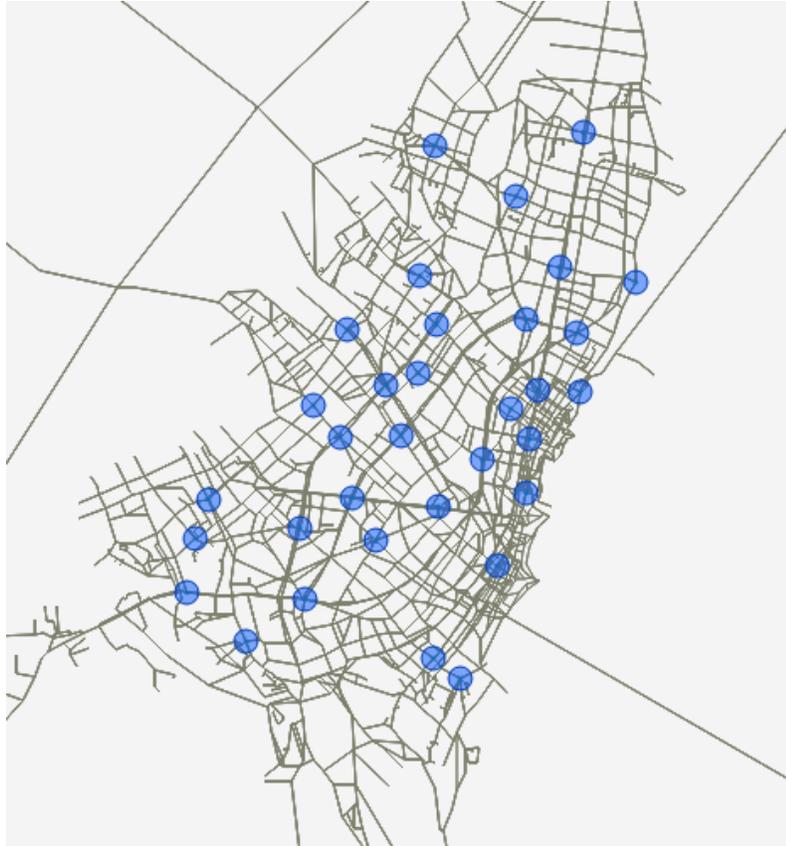
**Figura 4-2:** Perfil Horario de Viajes en Desarrollo Asociados a Bogotá—Análisis del Sistema.



*Fuente: Elaboración propia a partir de la encuesta de movilidad 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015).*

Como se mencionó el tercer y cuarto análisis asociado a los aforos vehiculares se realizó con base en el estudio de monitoreo (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015), en los que se consideraron un total de 33 aforos en intersecciones que se distribuyen espacialmente en la ciudad según lo expuesto en la Figura 4-3.

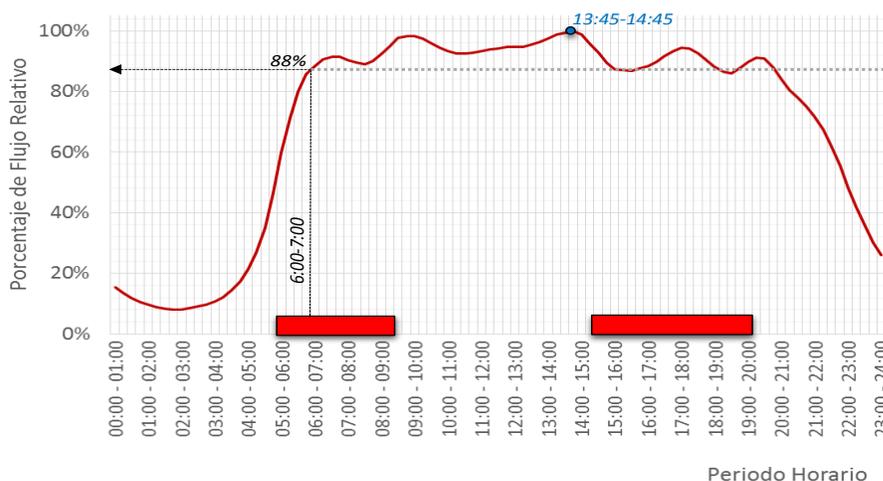
**Figura 4-3:** Ubicación de Estudios de Aforos Usados para el Análisis del Periodo Pico.



*Fuente: Elaboración propia.*

Se determinó el comportamiento horario del flujo de vehículos livianos en las intersecciones de monitoreo de la ciudad de Bogotá (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015). Para ello se eligieron las estaciones de aforo desarrolladas durante 24 horas en día hábiles representativos. La data resultante fue procesada de manera integral agrupando los volúmenes que accedan a la intersección en periodos de 15 minutos, los resultados se compilaron a nivel horario para estimar el perfil de flujos en nodos estratégicos de la ciudad y luego integrados a la ciudad. Lo anterior permitió identificar **la hora de la mañana con mayor tráfico de vehículos livianos** en la red vial del área de influencia del modelo. Se incluyó un perfil relativo al periodo de mayor flujo que considera únicamente los vehículos livianos esto se presentan en la Figura 4-4 (Los periodos de pico y placa se resaltan en rojo). El anterior análisis permitió estimar el periodo crítico de la mañana entre las 13:45 y las 14:45.

**Figura 4-4:** Perfil Relativo de Flujos Vehiculares Sobre la Red de Transporte de Bogotá – Análisis de Vehículos Livianos.



*Fuente: Elaboración propia a partir de Aforos - Estudio de Monitoreo (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015).*

El último análisis se realizó para la totalidad de las categorías vehiculares registradas como parte de los aforos: automóviles, vehículos de transporte público colectivo, camiones, motocicletas, motos y bicicletas. La depuración de la base de datos consideró las estaciones con periodo de 24 horas, carriles de tráfico mixto en días hábiles típicos. Con base en este análisis se logró estimar el periodo horario con mayor tráfico vehicular sobre la red de tráfico mixto. El perfil presentado en la Figura 4-5 se realizó considerando la totalidad de los flujos de la red, se presentan los resultados de manera relativa al periodo de mayor flujo que se establece entre las 6:30 y las 7:30, los análisis se definieron considerando todas las tipologías vehiculares.

**Figura 4-5:** Perfil Relativo de Flujos Vehiculares Sobre la Red de Transporte de Bogotá – Análisis del Sistema.



*Fuente: Elaboración propia a partir de Aforos - Estudio de Monitoreo (Secretaría Distrital de Movilidad, Estudios de Monitoreo 2015).*

El análisis del pico mediante cuatro metodologías buscó identificar variaciones en estas metodologías aplicadas para el caso Bogotá.

El conjunto de los análisis buscó generar una discusión sobre la definición del periodo de modelación, obteniendo 4 periodos diferentes, el primero considera la encuesta de movilidad de 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015) analizando la **totalidad de viajes urbanos** (6:15 y las 7:15), el segundo análisis derivado de la encuesta de movilidad considera **viajes urbanos únicamente del modo automóvil** que es el estudiado como

parte de este proyecto (6:30 y las 7:30), el tercer análisis tiene en cuenta los **automóviles observados en la red de transporte** (13:45 y las 14:45) y, el último análisis considera **totalidad de vehículos observados en la red de transporte** (6:30 y las 7:30).

Es importante destacar que las metodologías definidas por medio de la encuesta domiciliaria tienen entre otras las siguientes limitantes

- Desprecian los viajes de tránsito que usan la red vial de la ciudad (viajes sin origen ni destino en Bogotá) que no son captados en la OD.
- Los viajes realizados en camiones (no son objeto de la encuesta de movilidad), los cuales corresponden específicamente a carga.
- Se definen los análisis a nivel de viajes lo cual no hace referencia a demanda de infraestructura, en este sentido un viaje en transporte público tiene el mismo peso que un viaje que se desarrolla en automóvil.
- No se considera la demanda real de infraestructura en tanto no permite introducir el concepto de factores de congestión.

Las estimaciones realizadas por medio de aforos, aun cuando estos análisis reflejan los viajes de tránsito (no captados en la domiciliaria) y el flujo de vehículos de carga, presenta algunas limitantes dentro de las que se destacan:

- La tasa de flujo no siempre refleja la demanda real, en tanto se debe considerar la relación parabólica entre la velocidad y el flujo, y la saturación de la red.
- Hay una estacionalidad en los diferentes nodos de la red.

## 4.2 La Definición del Periodo Pico

La validación de la calibración es un proceso importante en la simulación del transporte al igual que la revisión general de la consistencia del modelo. El estadístico GEH recibe el nombre por su inventor Geoffrey E. Havers, esta fórmula empírica utilizada en la modelización del tráfico para comparar dos conjuntos de volúmenes de tráfico, los volúmenes de tráfico asignados por el modelo con los volúmenes de tráfico en el mundo real, para las condiciones base de calibración.

**Ecuación 4-1** Estadístico GEH

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

*Fuente: Traffic Modeling Guidelines (Smith y Blewitt, 2010).*

Donde:

M= Volumen de tráfico asignado.

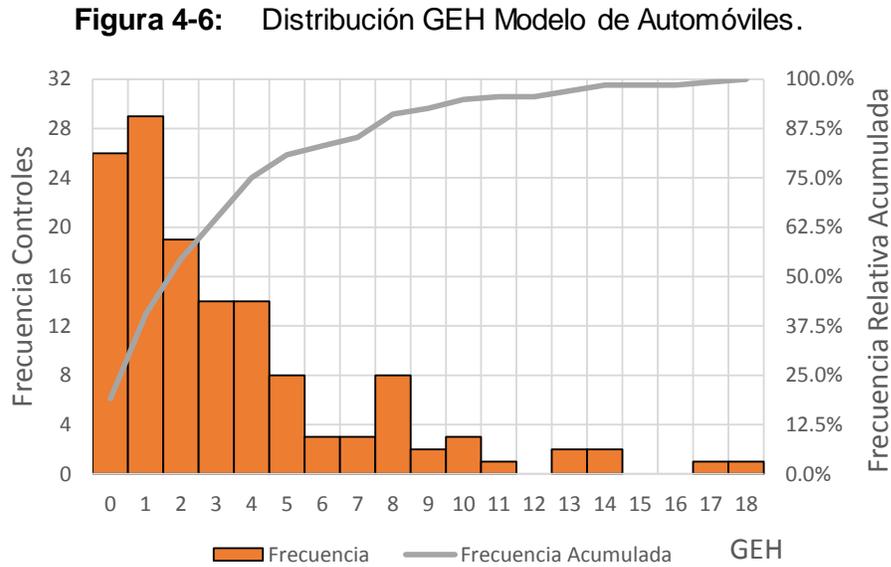
C= Aforo obtenido en campo (Smith y Blewitt, 2010).

Para la calibración de un modelo de transporte un GEH inferior a 5.0 define una adecuada correspondencia entre vehículos observados y simulados, un GEH en el rango 5.0 - 10.0 indica un ajuste moderado, mientras que los valores superiores a 10.0 indican una alta probabilidad de tener problemas en el punto de toma de información o representación del modelo (Al-qadi, I et al., 2009).

Si bien el Manual de Diseño de Carreteras del Reino Unido (Highways England, 2016) define para una adecuada calibración de un modelo, tener el 85% de los puntos de control con GEH inferior a 5.0, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México acepta un modelo calibrado si cumple alguna de las siguientes condiciones y preferiblemente todas: menos del 60% de los GEH menores a 5, 95% de los controles con GEH menor a 10, la totalidad de los GEH menores a 12 o las comparaciones de GEH agrupados para pantallas menores a 4.0 (Steer Davies Gleave, 2015).

Otro parámetro estadístico usado comúnmente para el análisis de la bondad de la calibración es el coeficiente de correlación de Pearson, la cual es la medida de la relación lineal entre los volúmenes calibrados y asignados en el modelo, a diferencia del estadístico GEH, este análisis es independiente de la escala de medida de las variables. El ideal para un modelo de transporte corresponde a una regresión lineal definida por una pendiente de 1.0 y un término independiente de 0.

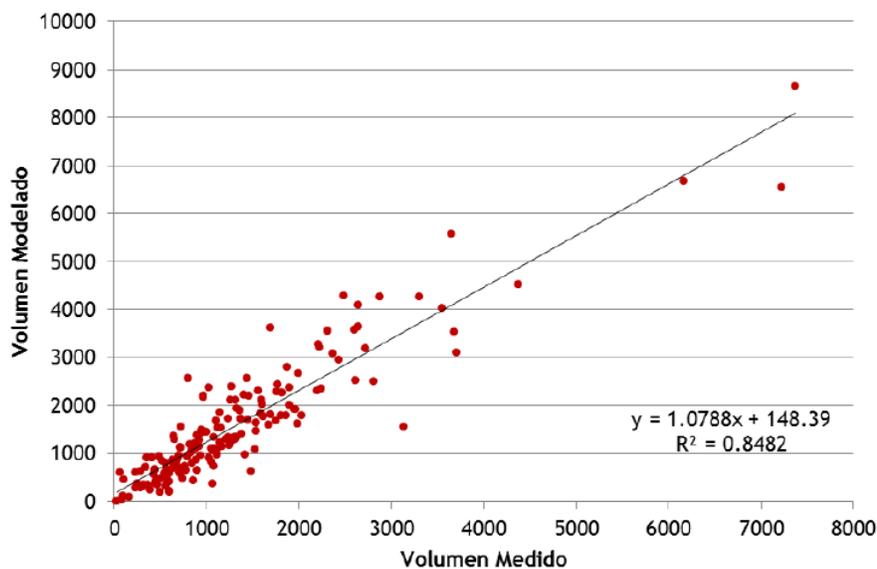
Para los flujos de vehículos privados el 75% de los GEHs son menores a 5, el 18% se encuentran en el rango 5-10 y los 7% de son mayores a 10. Siendo el GEH uno de los indicadores de calibración más estrictos para calibración de los modelos de transporte en ciudades con alto volumen de tráfico. En el contexto mencionado se puede afirmar la correcta calibración del modelo. En la Figura 4-6 se presentan las frecuencias de GEH y la frecuencia acumulada de los mismos.



Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la correlación de Pearson presentada en la Figura 3-42 se evidenció una pendiente de 0.97, un término independiente de 32 y un coeficiente de correlación de 0.96. La última referencia del modelo de transporte vehículo particular de la que se tiene referencia está asociada al modelo de la encuesta de movilidad de 2011 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2011), en la Figura 4-7 se presenta la dispersión de la calibración lograda en 2011, se observa en la regresión lineal una pendiente de 1.08, un término independiente de 148 y una correlación de 0.85.

**Figura 4-7:** Dispersión del Volumen de Automóviles Asignados Vs. Observados  
Modelo de Privados 2011.



*Fuente: Tomado de Informe Final Consultoría Encuesta de Movilidad Para Bogotá 2011 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2011).*

De acuerdo a la bibliografía y los datos obtenidos en GEH, se puede concluir que la totalidad de los modelos de transporte se encuentra calibrados correctamente. Los resultados agrupados se presentan a continuación.

#### **Modo Taxi:**

GEH=<5 = 69%

5<GEH=<10 = 24%

GEH>10 = 7%

Regresión= Pendiente (0.92), Término Independiente (13) y R2=(0.78).

**Modo Motocicleta:**

$$\text{GEH} \leq 5 \quad = 64\%$$

$$5 < \text{GEH} \leq 10 \quad = 15\%$$

$$\text{GEH} > 10 \quad = 21\%$$

Regresión= Pendiente (0.92), Término Independiente (41) y  $R^2=(0.89)$ .

**Modo Camiones Pequeños:**

$$\text{GEH} \leq 5 \quad = 95\%$$

$$5 < \text{GEH} \leq 10 \quad = 5\%$$

$$\text{GEH} > 10 \quad = 1\%$$

Regresión= Pendiente (0.86), Término Independiente (6) y  $R^2=(0.92)$ .

**Modo Camiones Grandes:**

$$\text{GEH} \leq 5 \quad = 100\%$$

$$5 < \text{GEH} \leq 10 \quad = 0\%$$

$$\text{GEH} > 10 \quad = 0\%$$

Regresión= Pendiente (0.99), Término Independiente (1) y  $R^2=(0.96)$ .

Con el fin de determinar el nivel de confianza del modelo de transporte se desarrolló una prueba de hipótesis T-Student, como primer paso se definió el estimador del error con respecto a los aforos y los volúmenes simulados, de esta manera se determinaron varios parámetros para cuantificar el error del modelo de simulación con respecto a los volúmenes vehiculares reales.

En primera instancia, debido a la compensación de los errores por la naturaleza de los signos, fue necesario estimar el error porcentual absoluto, con el fin de cuantificar la diferencia entre el valor verdadero y el valor estimado como un error positivo. Posteriormente se jerarquizaron los errores considerando la magnitud del volumen observado, y así, cuantificar ponderadamente el error total del modelo. Es decir, se ponderó el error porcentual absoluto por medio de la magnitud del volumen del link con respecto al mayor volumen del grupo de valores.

Una vez estimados los errores ponderados se validó la prueba de hipótesis, de esta manera se desarrolló una evaluación estadística para determinar si el modelo de simulación explica significativamente los datos observados por medio de una muestra de

datos resultantes de la simulación, con el fin de inferir si este mismo se ajusta a la situación observada.

De esta manera se determinó el promedio y la desviación estándar muestral del error absoluto ponderado del modelo, con el fin de determinar si es significativo, obteniéndose valores de 2.6% y 0.0841% respectivamente. Partiendo de la información anterior, se propuso la hipótesis: “determinar si el modelo de simulación explica los aforos observados con un error menor al 4%” y según se muestra en la siguiente figura.

**Figura 4-8:** Desarrollo de la Prueba de Hipótesis.

**Prueba de Hipótesis**

$$H_0: \mu = 4\%$$

$$H_A: \mu < 4\%$$

**Estadístico**

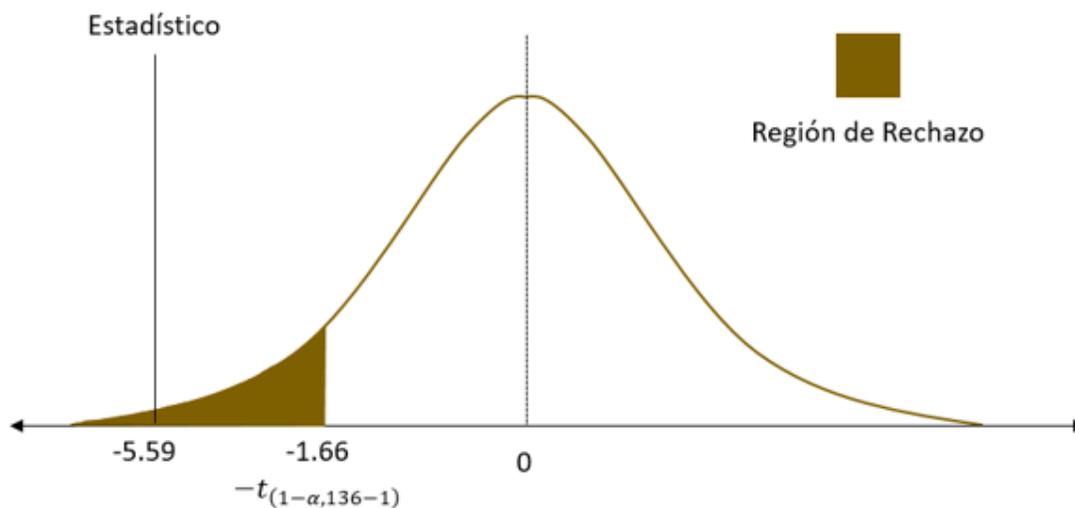
$$t_o = \frac{\overline{\text{Error}\%} - \mu}{\sqrt{\frac{S^2}{n}}} = \frac{2.6\% - 4\%}{\sqrt{\frac{0.0008217\%^2}{136}}} = -5.59$$

**Estimador**

$$\text{Estimador} = -t_{(1-\alpha, 136-1)} = -1.66$$

**Región de Rechazo**

Si Estadístico < Estimador ; Se rechaza la Hipótesis Nula ( $H_0$ )



Fuente: Elaboración propia.

Con base a los resultados anteriores, se pudo afirmar que existe suficiente evidencia estadística para afirmar, con un nivel de confianza del 95%, que el modelo estima la situación real con un error menor al 5%. Por lo tanto, es posible afirmar que el modelo de simulación es significativo y se ajusta a la realidad. Es importante destacar que los análisis realizados se desarrollaron bajo el supuesto de normalidad de la variable.

### **4.3 La Matriz Obtenida de Viajes en Automóvil**

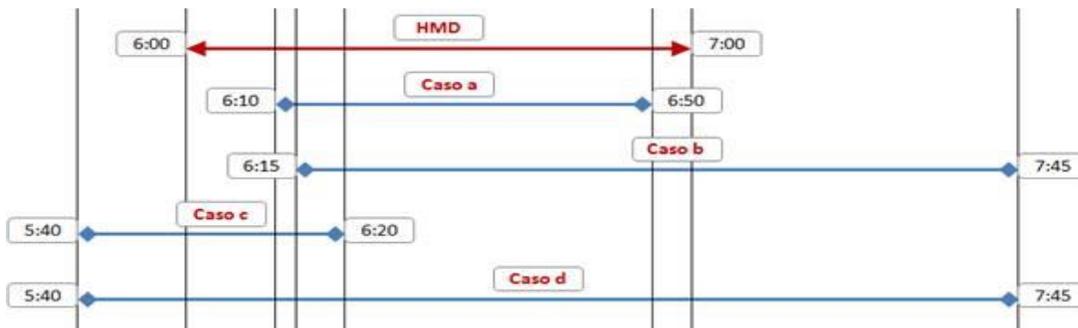
Una vez finalizado el proceso de corrección de las matrices para los diferentes modos de transporte, se obtuvo una matriz final de 263,458 viajes en automóvil durante la hora pico de la mañana, lo anterior considera un incremento del 3.5% con respecto a la matriz semilla (254,327 viajes). La validación de consistencia de esta matriz se realizó para el segmento de viajes urbanos (origen y destino en Bogotá), en tanto se dispone de información secundaria.

El segmento de viajes urbanos obtenidos por medio del modelo es de 244,256, este valor debe ser consistente con los viajes que de acuerdo a la encuesta de movilidad 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015) se realizan en la ciudad a nivel urbano. Las estimaciones de consistencia se realizaron mediante el procesamiento de la base de viajes de la encuesta de movilidad clasificado los mismos en los siguientes casos:

- Caso a: Viajes con inicio y fin dentro del periodo modelado.
- Caso b: Viajes con inicio en el periodo y fin fuera del periodo.
- Caso c: Viajes con inicio anterior al periodo y finalización en el periodo.
- Caso d: Viajes con inicio y fin fuera del periodo que transitan sobre la durante el periodo modelado.

La Figura 4-9 presenta de manera gráfica cada uno de estos casos. La estimación de la cantidad de viajes urbanos que aplican a cada caso se realizó por medio de la encuesta de movilidad de 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015) obteniéndose los siguientes resultados: 93,476 caso a, 62,767 (caso b), 62,862 (caso c) y 3,159 (caso d). Lo anterior suma un total de 222,264 viajes, esto implica que la matriz del modelo representa el 91% de la matriz obtenida mediante la encuesta de movilidad.

**Figura 4-9:** Casos de Viajes que se Calibran en el Modelo.



*Fuente: Elaboración propia.*

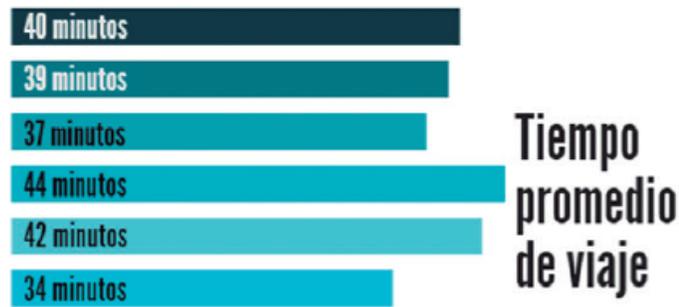
Además de los supuestos que ya hacen parte del modelo la metodología usada para validar la magnitud tiene condicionales importantes, que únicamente permiten validar un orden global de magnitud.

#### 4.4 El Tiempo de Viaje Modelado

Al analizar los tiempos de viaje para los usuarios que se movilizan en vehículo particular dentro del área urbana de la ciudad se obtuvo a partir del modelo una media de 48.0 minutos, mientras la estimación realizada por medio de la encuesta de movilidad de 2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015) para el pico de la mañana de un día hábil típico se estimó en 57 minutos. Lo anterior indica una diferencia de 9.0 minutos.

Al comparar el tiempo de viaje diario de la encuesta de movilidad 2015 (54.3 minutos) con el tiempo de viaje que se muestra en los reportes anuales de 2014 publicados por la Cámara de Comercio de Bogotá (40 minutos), se obtiene una diferencia de 14.3 minutos (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015). En la Figura 4-10 se presentan los datos históricos de tiempos de viaje en vehículo particular.

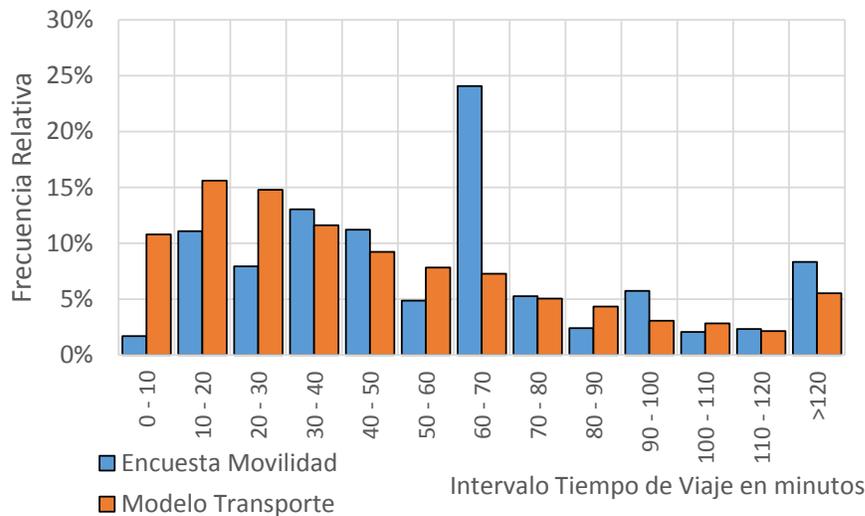
**Figura 4-10:** Tiempo de Viaje Histórico en Vehículo Particular Según Reporte Anual de Movilidad.



Fuente: Tomado de Reporte Anual de Movilidad 2014 - Observatorio de Movilidad (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

Al comparar la distribución de los tiempos de viaje de la encuesta de movilidad (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015) y los tiempos de viaje del modelo, en el periodo pico de la mañana y para los viajes urbanos se obtiene la distribución presenta en la Figura 4-11. Se observa una distribución suave para los tiempos de viaje en simulados y una distribución con cambios violentos para los tiempos de viaje declarados como parte de la encuesta de movilidad.

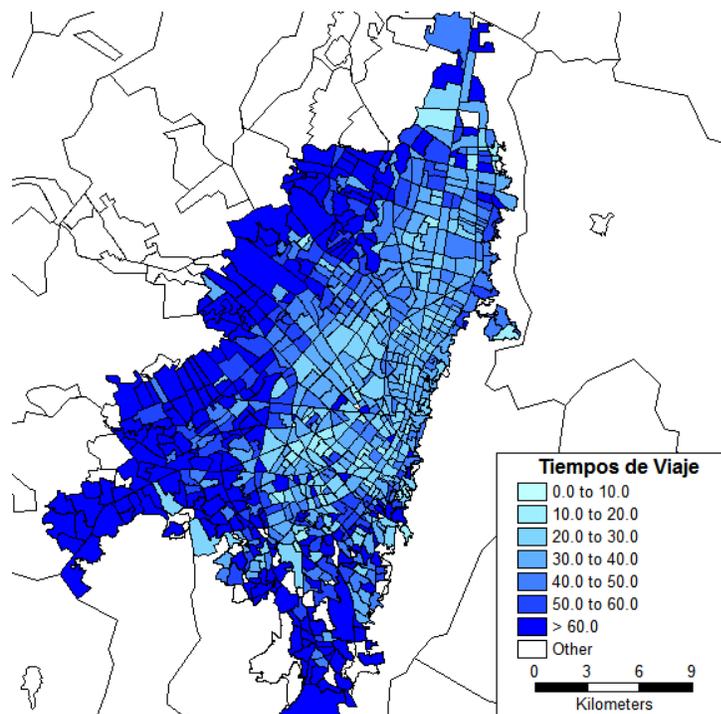
**Figura 4-11:** Distribución de los Tiempos de Viaje Urbanos Modelado vs. Encuesta de Movilidad.



Fuente: Tomado de Reporte Anual de Movilidad 2014 - Observatorio de Movilidad (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015).

Los tiempos medios de viaje en vehículo particular en vehículo particular para las zonas del área urbana se presentan en la Figura 4-12, los resultados dejan las zonas periféricas con tiempos de viaje muy prolongados durante el periodo pico de la mañana, por su parte sectores como Ciudad Salitre presentan los menores tiempos de viaje en la ciudad.

**Figura 4-12:** Tiempos de Viaje Promedios en Hora Pico por ZAT–Resultados del Modelo.



*Fuente: Elaboración Propia*

## 5. Conclusiones

Durante el desarrollo de la actualización del modelo oferta se identificó una tasa de crecimiento media anual de 0.21% (kilómetros/carril) entre el 2011 y el 2015 (IDU, 2015), en este mismo periodo la tasa de crecimiento media del parque automotor de vehículos particulares de la ciudad creció a una tasa del 7.25% (Cámara de Comercio de Bogotá, 2015), por su parte las etapas de viaje que se desarrollan en automóvil en este mismo periodo crecieron a una tasa media del 3.62% (Secretaría Distrital de Movilidad, 2015). Lo anterior permite concluir que en los últimos años ha existido un crecimiento de la demanda mucho más alto que el crecimiento de la oferta de infraestructura, esto se traduce en mayores niveles de saturación de la red. De acuerdo a análisis realizados por medio de la curva logística de Tanner, se obtiene una tasa de motorización en Bogotá para el año 2015 de 0.17 vehículos/habitante, se espera esta tasa comience a estabilizar en el año 2030 con un valor de 0.25 vehículos/habitante, esto es llamado a la planeación del sistema de transporte público de la ciudad.

La programación desarrollada para la asignación del modelo de transporte incorpora algoritmos que permiten representar como parte del modelo de elección de ruta tanto la saturación derivada de la operación del transporte público como la impedancia que generan los cobros de peaje en diferentes arcos de la red. Para lo anterior, se definieron sub-rutinas, redes y atributos específicos que se explican en el documento y que hacen parte de los productos entregados como parte de este documento. Es importante resaltar el avance en la definición de los factores de equivalencia en condiciones de congestión que genera el presente trabajo y que se constituye como una referencia en las investigaciones porvenir.

El proceso de calibración del modelo logró indicadores de bondad que permiten asegurar la consistencia, representatividad y confiabilidad de la herramienta de planeación. Lo anterior se concluye luego de analizar los resultados generados al someter los resultados

del modelo ante indicadores de bondad de la calibración como: el estadístico GEH, la correlación de Pearson y la prueba de hipótesis T-Student; en cada una de las mismas se obtuvieron indicadores de bondad aceptables de acuerdo a las referencias bibliográficas. Además de los indicadores de bondad usados comúnmente (correlación de Pearson y el GEH), se construye en este documento una metodología novedosa como lo es la prueba de hipótesis T-Student con ponderación de errores, la jerarquiza de manera consistente con la escala del modelo los errores y define el nivel de confiabilidad de las estimaciones.

Además de los análisis de sensibilidad realizados al modelo de transporte por medio de variables como las funciones de demora y el valor del tiempo, que reflejaron efectos en la asignación de la demanda consistentes y lógicos con los cambios de las variables; que permiten concluir con una adecuada sensibilidad del modelo; se logró cuantificar la importancia y los efectos que tiene la operación del transporte público en la saturación de la red y por tanto en el modo de asignación o escogencia de ruta.

## 6.Recomendaciones

Con el fin de tener una mayor robustez en el modelo de oferta, es recomendable **realizar estudios específicos para representar de manera detallada las características operacionales de la red vial**, que permitan clasificar la infraestructura en tipologías asociadas a sus condiciones operacionales, facilitando la evaluación de nuevos proyectos. En el contexto anterior y según los resultados obtenidos en este proyecto, es importante realizar estudios asociados a: saturación, funciones de demora, capacidad, afectación de las anteriores variables por el estado de la red, equivalencia en congestión del transporte público y los demás tipos de vehículo simulados. Claramente los resultados deben ser alimentados en el modelo y calibradas las variables.

Como se presentó a lo largo del documento, el uso de modos de transporte como la motocicleta se ha duplicado en el periodo 2011-2015, la entrada en operación de Uber y otras aplicaciones tecnológicas genera una alta probabilidad de influencia considerable en los subsistemas de transporte de otros modos y, los cambios en la regulación que define el sistema de movilidad pueden haber afectado en alguna medida los patrones de movilidad. Si bien no se logró para el desarrollo del presente estudio tener a disposición la información asociadas a las encuestas origen-destino en hogares (EODH), ni las encuestas origen-destino de interceptación (EODI) desarrolladas como parte del Contrato de Consultoría SDM-2014-1485 (Encuesta de Movilidad de Bogotá 2015), se considera importante **actualizar el modelo con la información de origen destino tomada en 2015** una vez la misma se encuentre disponible.

La realidad compleja de la ciudad y la región trasciende las barreras político-administrativas de los municipios. En este sentido es importante **consolidar un modelo de transporte regional** que represente adecuadamente el sistema de movilidad facilitando la evaluación de proyectos que en este momento son de importancia para la ciudad como lo son la: Avenida Longitudinal de Occidente, Av. Centenario, Av. José Celestino Mutis, Conexión con Perimetral de Oriente, entre otros. Como parte del desarrollo de un modelo de transporte regional se deben definir zonas consistentes con la nueva área de influencia del modelo, definiéndose con mayor detalle en las nuevas zonas de índole departamental y nacional que permitan representar la demanda de tránsito con mayor certeza. En este

sentido además de incorporar una red de oferta carretera del área metropolitana, se deben realizar estudios que permitan definir las características de la demanda regional, donde es muy importante realizar una segmentación detallada del transporte de carga.

La segmentación de viajes particulares que permite generar la información disponible, tiene supuestos importantes dentro de los que se destacan que: el estrato del viajero corresponde al estrato de la zona donde se origina el viaje (todos los viajes de hora pico son basados en el hogar), dentro de una ZAT existe un único estrato, la ocupación vehicular de cada viaje es único para cada ZAT, entre otros. Teniendo en cuenta lo anterior, es posible **mejorar la metodología de la segmentación de vehículos livianos**, con el fin de mitigar el efecto de los supuestos que delimitan el modelo. Bajo este contexto, es importante en mejorar el nivel de detalle del análisis para los taxis, en tanto a una ocupación media para todo el sistema que define la conversión de viajes unipersonales a viajes vehiculares, puede ser mejorado por medio de análisis sectoriales a nivel de ZAT.

Igualmente, se recomienda la **realización de estudios de preferencia declarada** que permitan actualizar los valores del tiempo de los automovilistas y del transporte de carga, en tanto se deben recopilar de manera directa sobre los valores del tiempo de taxis ocupados, taxis vacíos y motociclistas. De manera complementaria para modos como la motocicleta, el taxi lleno y el taxi vacío es importante **desarrollar estudios las variables que inciden en su elección de ruta**.

Los modelos para la toma de decisiones y planificación de la ciudad en términos de transporte y movilidad, suelen cimentarse en análisis para la hora o periodos de máxima demanda (HMD). Teniendo en cuenta lo anterior, se han generado diferentes conceptos bibliográficos y puntos de vista de especialistas relativos a la manera adecuada de desarrollo metodológico para la definición de dichos periodos de HMD. Se recomienda que la Secretaría de Movilidad de Bogotá, como complemento al Manual de Planeación, **defina una metodología estandarizada que permita estimar la hora o periodos pico en la ciudad de Bogotá**, en función del subsistema de análisis o interés, la cual involucre en cada caso las particularidades y variables de los diferentes modos de transporte de la ciudad.

Considerando los costos y tiempos de procesamiento de la información recopilada de manera manual en campo, es importante evaluar la viabilidad de **implementar nuevas metodologías de toma de información** que permitan contar con una información actualizada para hacer darle más dinámica y certeza a diferentes herramientas para la planeación del transporte.

# Anexos

## Anexo A. Detalle de los Indicadores de Bondad en Cada Punto de Control

Tabla 6-1: Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Automóvil [14].

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
833	21146	385	435	50	0.13	2.46
20093	20100	363	413	50	0.14	2.54
20099	20100	336	295	-41	-0.12	2.29
20102	20100	167	192	25	0.15	1.89
20143	90145	773	834	61	0.08	2.16
20149	90145	589	565	-24	-0.04	1.01
20153	90145	820	803	-17	-0.02	0.59
20154	90145	158	144	-14	-0.09	1.10
20267	90291	353	136	-217	-0.61	13.88
20286	90291	510	383	-127	-0.25	6.00
20319	20321	1,029	1,713	684	0.66	18.47
20327	20321	283	310	27	0.10	1.57
20327	20335	484	745	261	0.54	10.53
20334	20335	364	342	-22	-0.06	1.20
20336	20335	352	361	9	0.03	0.47
20342	20100	489	554	65	0.13	2.87
20374	20335	111	144	33	0.29	2.90
20384	90385	418	535	117	0.28	5.37
20385	90291	104	85	-19	-0.18	1.92
20386	90385	999	996	-3	0.00	0.09
20392	90385	237	378	141	0.59	8.02
20404	90385	217	256	39	0.18	2.54
20446	20452	570	791	221	0.39	8.48
20449	20450	2,412	2,391	-21	-0.01	0.44
20464	20510	177	324	147	0.83	9.31
20465	20510	593	500	-93	-0.16	3.99
20473	20452	931	835	-96	-0.10	3.21
20492	20687	1,136	1,032	-104	-0.09	3.14
20515	20510	575	804	229	0.40	8.71
20538	20542	185	546	361	1.95	18.90
20540	20542	3,780	3,534	-246	-0.07	4.06
20544	20542	692	760	68	0.10	2.53
20545	20546	668	1,304	636	0.95	20.26
20548	20542	360	529	169	0.47	8.02
20549	20546	782	833	51	0.07	1.79
20580	20583	1,075	934	-141	-0.13	4.44
20602	20546	1,610	1,501	-109	-0.07	2.77
20602	20583	737	723	-14	-0.02	0.52
20603	20583	1,080	1,301	221	0.20	6.41
20606	20546	605	782	177	0.29	6.71

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
20614	22013	111	161	50	0.45	4.25
20617	90291	43	104	61	1.42	7.14
20640	22013	2,226	2,434	208	0.09	4.31
20644	22013	400	832	432	1.08	17.40
20680	21289	744	630	-114	-0.15	4.36
20685	20686	952	844	-108	-0.11	3.59
20691	20689	383	459	76	0.20	3.71
20695	20692	192	258	66	0.34	4.39
20696	20979	353	330	-23	-0.06	1.23
20749	20689	149	157	8	0.05	0.62
20759	20785	304	711	407	1.34	18.06
20775	21009	451	529	78	0.17	3.54
20783	20787	390	494	104	0.27	4.93
20794	20787	574	549	-25	-0.04	1.07
20803	20785	465	511	46	0.10	2.10
20951	20952	1,024	846	-178	-0.17	5.81
20953	20952	437	361	-76	-0.17	3.80
20984	20979	769	735	-34	-0.04	1.25
20987	20988	182	136	-46	-0.25	3.61
20998	21001	626	501	-125	-0.20	5.25
21008	20775	1,387	1,477	90	0.07	2.38
21017	21018	626	908	282	0.45	10.19
21020	21018	908	1,027	119	0.13	3.83
21024	21018	1,459	1,681	222	0.15	5.61
21031	21018	1,184	1,453	269	0.23	7.40
21032	21044	842	857	15	0.02	0.51
21033	21044	425	530	105	0.25	4.80
21045	21044	431	419	-12	-0.03	0.58
21049	21104	239	334	95	0.40	5.60
21093	91120	1,825	1,692	-133	-0.07	3.17
21094	91120	401	488	87	0.22	4.12
21103	21104	992	1,431	439	0.44	12.62
21108	91120	969	850	-119	-0.12	3.96
21111	21104	350	419	69	0.20	3.51
21124	91120	1,271	1,349	78	0.06	2.15
21149	21146	363	456	93	0.26	4.59
21177	21001	341	569	228	0.67	10.70
21221	21198	1,270	1,273	3	0.00	0.09
21223	21262	286	431	145	0.51	7.64
21261	21262	556	839	283	0.51	10.72
21264	20988	568	434	-134	-0.24	5.99
21267	21262	2,005	1,941	-64	-0.03	1.43
21284	21282	2,336	2,322	-14	-0.01	0.29
21288	21289	217	272	55	0.26	3.54

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
21320	21282	1,169	1,237	68	0.06	1.96
21462	21480	359	212	-147	-0.41	8.69
21463	21480	1,529	1,613	84	0.06	2.13
21479	21480	499	638	139	0.28	5.83
21568	21605	726	820	94	0.13	3.39
21603	21605	1,070	1,100	30	0.03	0.90
21611	21605	1,375	1,373	-2	0.00	0.05
21676	21289	1,284	1,252	-32	-0.03	0.91
21702	20979	976	1,312	336	0.34	9.95
21727	20883	142	224	82	0.58	6.05
21760	20883	245	198	-47	-0.19	3.15
21769	20885	137	332	195	1.43	12.76
21786	20885	406	340	-66	-0.16	3.43
21825	21330	1,444	1,635	191	0.13	4.87
21842	21330	475	514	39	0.08	1.75
21845	21330	640	829	189	0.30	6.98
21914	20952	1,208	1,573	365	0.30	9.79
21922	20988	661	491	-170	-0.26	7.06
21924	20988	694	589	-105	-0.15	4.15
21950	21153	239	257	18	0.08	1.17
21956	21153	424	333	-91	-0.22	4.69
21997	20952	2,222	2,164	-58	-0.03	1.23
22028	21480	3,414	3,375	-39	-0.01	0.68
22033	21282	850	1,048	198	0.23	6.41
22045	20452	150	158	8	0.05	0.61
22539	20583	1,160	1,346	186	0.16	5.25
25012	25011	2,343	2,041	-302	-0.13	6.44
25026	25027	4,030	3,732	-298	-0.07	4.79
25027	25026	2,090	2,334	244	0.12	5.19
25044	25045	744	684	-60	-0.08	2.24
25046	25045	2,435	1,731	-704	-0.29	15.41
25047	25048	1,076	860	-216	-0.20	6.96
25049	25050	2,009	1,978	-31	-0.02	0.70
25051	25050	1,767	1,942	175	0.10	4.07
25059	25058	1,518	910	-608	-0.40	17.46
25064	25065	914	961	47	0.05	1.52
25065	25064	1,701	1,323	-378	-0.22	9.73
25088	25112	646	636	-10	-0.02	0.39
25096	25097	2,820	2,750	-70	-0.02	1.32
25097	25096	1,905	1,481	-424	-0.22	10.31
25103	25104	1,106	839	-267	-0.24	8.57
25104	25103	674	607	-67	-0.10	2.63
25112	25088	1,257	1,306	49	0.04	1.36
25118	25119	238	183	-55	-0.23	3.75
25133	25134	907	994	87	0.10	2.82

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
25134	25133	1,016	907	-109	-0.11	3.53
25141	25140	1,323	1,447	124	0.09	3.34
25142	21282	1,173	1,060	-113	-0.10	3.39
25144	21262	439	683	244	0.56	10.30
90325	20321	673	717	44	0.07	1.66
90617	22013	846	928	82	0.10	2.76
91609	21605	2,593	2,137	-456	-0.18	9.37

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-2:** Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Automóvil [14].

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
833	21146	204	126	-78	-0.38	6.05
20093	20100	291	224	-67	-0.23	4.16
20099	20100	91	86	-5	-0.05	0.49
20102	20100	105	60	-45	-0.43	4.95
20143	90145	481	497	16	0.03	0.73
20149	90145	544	548	4	0.01	0.18
20153	90145	255	199	-56	-0.22	3.72
20154	90145	152	211	59	0.39	4.38
20267	90291	245	132	-113	-0.46	8.23
20286	90291	215	369	154	0.72	9.00
20319	20321	208	272	64	0.31	4.14
20327	20321	144	112	-32	-0.22	2.83
20327	20335	266	244	-22	-0.08	1.37
20334	20335	135	126	-9	-0.07	0.80
20336	20335	105	2	-103	-0.98	14.16
20342	20100	337	404	67	0.20	3.50
20374	20335	60	118	58	0.97	6.16
20384	90385	236	258	22	0.09	1.39
20385	90291	118	127	9	0.08	0.85
20386	90385	260	253	-7	-0.03	0.42
20392	90385	174	104	-70	-0.40	5.95
20404	90385	145	188	43	0.29	3.30
20446	20452	296	341	45	0.15	2.54
20449	20450	605	576	-29	-0.05	1.18
20464	20510	101	60	-41	-0.40	4.52
20465	20510	428	225	-203	-0.47	11.20
20473	20452	117	319	202	1.73	13.69
20492	20687	276	258	-18	-0.06	1.09
20515	20510	192	152	-40	-0.21	3.02

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
20538	20542	105	38	-67	-0.63	7.86
20540	20542	786	799	13	0.02	0.45
20544	20542	375	400	25	0.07	1.27
20545	20546	99	230	131	1.32	10.20
20548	20542	208	94	-114	-0.55	9.28
20549	20546	299	233	-66	-0.22	4.04
20580	20583	228	262	34	0.15	2.17
20602	20546	427	391	-36	-0.08	1.79
20602	20583	212	125	-87	-0.41	6.73
20603	20583	260	408	148	0.57	8.09
20606	20546	189	248	59	0.31	4.01
20614	22013	57	57	0	0.00	0.01
20617	90291	267	14	-253	-0.95	21.40
20640	22013	992	867	-125	-0.13	4.11
20644	22013	140	274	134	0.95	9.29
20680	21289	222	177	-45	-0.20	3.20
20685	20686	483	450	-33	-0.07	1.53
20691	20689	205	179	-26	-0.13	1.88
20695	20692	122	119	-3	-0.02	0.25
20696	20979	282	287	5	0.02	0.28
20749	20689	141	151	10	0.07	0.82
20759	20785	78	168	90	1.15	8.08
20775	21009	282	177	-105	-0.37	6.92
20783	20787	155	154	-1	-0.01	0.10
20794	20787	204	166	-38	-0.18	2.76
20803	20785	226	269	43	0.19	2.73
20951	20952	485	320	-165	-0.34	8.23
20953	20952	398	287	-111	-0.28	6.01
20984	20979	421	376	-45	-0.11	2.24
20987	20988	156	147	-9	-0.06	0.75
20998	21001	333	190	-143	-0.43	8.85
21008	20775	758	640	-118	-0.16	4.47
21017	21018	253	155	-98	-0.39	6.88
21020	21018	526	645	119	0.23	4.92
21024	21018	457	607	150	0.33	6.52
21031	21018	384	381	-3	-0.01	0.15
21032	21044	409	335	-74	-0.18	3.81
21033	21044	170	209	39	0.23	2.86
21045	21044	194	206	12	0.06	0.85
21049	21104	151	88	-63	-0.42	5.81
21093	91120	357	286	-71	-0.20	3.96
21094	91120	143	147	4	0.03	0.33
21103	21104	371	407	36	0.10	1.81
21108	91120	275	292	17	0.06	0.99
21111	21104	274	137	-137	-0.50	9.53

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
21124	91120	432	318	-114	-0.26	5.89
21149	21146	124	150	26	0.21	2.23
21177	21001	119	81	-38	-0.32	3.79
21221	21198	408	416	8	0.02	0.39
21223	21262	120	159	39	0.32	3.26
21261	21262	239	217	-22	-0.09	1.43
21264	20988	339	384	45	0.13	2.37
21267	21262	406	425	19	0.05	0.93
21284	21282	326	335	9	0.03	0.50
21288	21289	17	18	1	0.05	0.19
21320	21282	213	198	-15	-0.07	1.04
21462	21480	104	19	-85	-0.82	10.90
21463	21480	245	316	71	0.29	4.25
21479	21480	62	58	-4	-0.07	0.54
21568	21605	207	225	18	0.09	1.20
21603	21605	235	214	-21	-0.09	1.41
21611	21605	308	252	-56	-0.18	3.33
21676	21289	250	174	-76	-0.31	5.24
21702	20979	597	768	171	0.29	6.54
21727	20883	173	197	24	0.14	1.77
21760	20883	223	96	-127	-0.57	10.02
21769	20885	147	201	54	0.37	4.09
21786	20885	377	263	-114	-0.30	6.35
21825	21330	256	244	-12	-0.05	0.77
21842	21330	155	122	-33	-0.21	2.81
21845	21330	229	254	25	0.11	1.58
21914	20952	755	744	-11	-0.01	0.40
21922	20988	245	102	-143	-0.58	10.86
21924	20988	253	349	96	0.38	5.53
21950	21153	200	158	-42	-0.21	3.10
21956	21153	213	98	-115	-0.54	9.21
21997	20952	552	399	-153	-0.28	7.04
22028	21480	265	291	26	0.10	1.53
22033	21282	511	490	-21	-0.04	0.95
22045	20452	37	12	-25	-0.66	4.93
22539	20583	355	386	31	0.09	1.61
25012	25011	91	75	-16	-0.18	1.77
25026	25027	268	424	156	0.58	8.38
25027	25026	322	322	0	0.00	0.00
25044	25045	395	433	38	0.10	1.87
25046	25045	607	530	-77	-0.13	3.21
25047	25048	611	524	-87	-0.14	3.64
25049	25050	458	455	-3	-0.01	0.15
25051	25050	407	554	147	0.36	6.70

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
25059	25058	403	201	-202	-0.50	11.61
25064	25065	200	290	90	0.45	5.72
25065	25064	382	289	-93	-0.24	5.08
25088	25112	209	218	9	0.04	0.62
25096	25097	350	590	240	0.69	11.07
25097	25096	541	543	2	0.00	0.06
25103	25104	121	125	4	0.04	0.39
25104	25103	191	244	53	0.28	3.62
25112	25088	403	318	-85	-0.21	4.47
25118	25119	123	120	-3	-0.02	0.26
25133	25134	272	380	108	0.40	5.96
25134	25133	167	181	14	0.08	1.03
25141	25140	455	493	38	0.08	1.74
25142	21282	318	242	-76	-0.24	4.55
25144	21262	201	224	23	0.11	1.58
90325	20321	128	200	72	0.56	5.61
90617	22013	377	385	8	0.02	0.39
91609	21605	429	397	-32	-0.08	1.59

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-3:** Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Automóvil [14].

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
833	21146	289	274	-15	-0.05	0.90
20093	20100	670	563	-107	-0.16	4.29
20099	20100	838	544	-294	-0.35	11.20
20102	20100	377	348	-29	-0.08	1.50
20143	90145	3,252	3,630	378	0.12	6.45
20149	90145	858	950	92	0.11	3.07
20153	90145	587	508	-79	-0.13	3.38
20154	90145	407	504	97	0.24	4.54
20267	90291	320	52	-268	-0.84	19.68
20286	90291	936	810	-126	-0.14	4.28
20319	20321	2,067	1,894	-173	-0.08	3.89
20327	20321	1,125	1,060	-65	-0.06	1.97
20327	20335	1,097	724	-373	-0.34	12.37
20334	20335	340	306	-34	-0.10	1.89
20336	20335	634	563	-71	-0.11	2.89
20342	20100	794	705	-89	-0.11	3.27
20374	20335	399	500	101	0.25	4.76
20384	90385	1,402	1,299	-103	-0.07	2.80
20385	90291	122	77	-45	-0.37	4.54
20386	90385	588	236	-352	-0.60	17.33
20392	90385	1,243	1,406	163	0.13	4.47

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
20404	90385	555	554	-1	0.00	0.06
20446	20452	684	998	314	0.46	10.83
20449	20450	2,944	3,093	149	0.05	2.71
20464	20510	316	163	-153	-0.48	9.90
20465	20510	507	314	-193	-0.38	9.53
20473	20452	785	731	-54	-0.07	1.97
20492	20687	677	787	110	0.16	4.08
20515	20510	280	282	2	0.01	0.14
20538	20542	461	144	-317	-0.69	18.25
20540	20542	3,949	3,544	-405	-0.10	6.62
20544	20542	936	1,036	100	0.11	3.18
20545	20546	1,231	1,193	-38	-0.03	1.09
20548	20542	368	143	-225	-0.61	14.09
20549	20546	1,212	1,150	-62	-0.05	1.80
20580	20583	743	802	59	0.08	2.12
20602	20546	1,164	1,066	-98	-0.08	2.93
20602	20583	961	1,065	104	0.11	3.25
20603	20583	934	1,464	530	0.57	15.30
20606	20546	307	387	80	0.26	4.31
20614	22013	52	61	9	0.17	1.19
20617	90291	461	2	-459	-0.99	30.13
20640	22013	808	713	-95	-0.12	3.44
20644	22013	207	1,145	938	4.53	36.08
20680	21289	461	362	-99	-0.22	4.90
20685	20686	1,641	1,109	-532	-0.32	14.36
20691	20689	271	332	61	0.22	3.49
20695	20692	123	681	558	4.54	27.84
20696	20979	107	113	6	0.06	0.60
20749	20689	96	96	0	0.00	0.00
20759	20785	417	631	214	0.51	9.37
20775	21009	235	273	38	0.16	2.40
20783	20787	323	705	382	1.18	16.85
20794	20787	308	106	-202	-0.66	14.08
20803	20785	245	282	37	0.15	2.25
20951	20952	310	261	-49	-0.16	2.91
20953	20952	157	161	4	0.03	0.34
20984	20979	283	305	22	0.08	1.31
20987	20988	111	91	-20	-0.18	1.97
20998	21001	350	163	-187	-0.54	11.70
21008	20775	363	99	-264	-0.73	17.39
21017	21018	347	409	62	0.18	3.17
21020	21018	457	739	282	0.62	11.52
21024	21018	728	1,077	349	0.48	11.63
21031	21018	323	647	324	1.00	14.70

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
21032	21044	351	365	14	0.04	0.74
21033	21044	519	617	98	0.19	4.11
21045	21044	132	76	-56	-0.43	5.54
21049	21104	284	125	-159	-0.56	11.13
21093	91120	1,180	1,332	152	0.13	4.29
21094	91120	665	352	-313	-0.47	13.87
21103	21104	894	1,013	119	0.13	3.85
21108	91120	715	644	-71	-0.10	2.70
21111	21104	346	261	-85	-0.24	4.85
21124	91120	1,957	1,569	-388	-0.20	9.23
21149	21146	181	183	2	0.01	0.14
21177	21001	156	180	24	0.15	1.84
21221	21198	709	779	70	0.10	2.58
21223	21262	205	437	232	1.13	12.96
21261	21262	241	245	4	0.02	0.27
21264	20988	827	782	-45	-0.05	1.59
21267	21262	515	521	6	0.01	0.27
21284	21282	364	405	41	0.11	2.08
21288	21289	133	93	-40	-0.30	3.73
21320	21282	162	163	1	0.01	0.07
21462	21480	120	49	-71	-0.59	7.68
21463	21480	879	689	-190	-0.22	6.80
21479	21480	73	64	-9	-0.13	1.11
21568	21605	252	394	142	0.56	7.92
21603	21605	630	231	-399	-0.63	19.21
21611	21605	297	324	27	0.09	1.54
21676	21289	234	195	-39	-0.17	2.66
21702	20979	950	1,144	194	0.20	6.00
21727	20883	139	114	-25	-0.18	2.27
21760	20883	567	250	-317	-0.56	15.66
21769	20885	172	322	150	0.87	9.53
21786	20885	330	226	-104	-0.32	6.26
21825	21330	350	388	38	0.11	1.98
21842	21330	131	115	-16	-0.12	1.43
21845	21330	343	415	72	0.21	3.68
21914	20952	1,210	1,330	120	0.10	3.37
21922	20988	187	137	-50	-0.27	3.94
21924	20988	386	360	-26	-0.07	1.36
21950	21153	114	100	-14	-0.12	1.33
21956	21153	107	96	-11	-0.11	1.12
21997	20952	528	426	-102	-0.19	4.65
22028	21480	519	776	257	0.50	10.11
22033	21282	479	612	133	0.28	5.70
22045	20452	139	58	-81	-0.58	8.16
22539	20583	2,454	2,311	-143	-0.06	2.92

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
25012	25011	630	383	-247	-0.39	10.98
25026	25027	687	727	40	0.06	1.50
25027	25026	1,096	1,257	161	0.15	4.70
25044	25045	555	458	-97	-0.18	4.32
25046	25045	1,029	1,044	15	0.01	0.45
25047	25048	213	311	98	0.46	6.03
25049	25050	723	691	-32	-0.04	1.19
25051	25050	1,652	1,424	-228	-0.14	5.80
25059	25058	1,081	897	-184	-0.17	5.84
25064	25065	896	930	34	0.04	1.14
25065	25064	2,847	1,727	-1,120	-0.39	23.42
25088	25112	519	565	46	0.09	1.99
25096	25097	734	962	228	0.31	7.82
25097	25096	1,633	1,632	-1	0.00	0.03
25103	25104	673	491	-182	-0.27	7.55
25104	25103	2,325	2,407	82	0.04	1.68
25112	25088	1,910	1,644	-266	-0.14	6.30
25118	25119	284	269	-15	-0.05	0.88
25133	25134	1,016	1,131	115	0.11	3.52
25134	25133	284	303	19	0.07	1.12
25141	25140	1,484	1,544	60	0.04	1.54
25142	21282	515	454	-61	-0.12	2.77
25144	21262	106	110	4	0.03	0.34
90325	20321	840	906	66	0.08	2.23
90617	22013	631	654	23	0.04	0.89
91609	21605	762	1,151	389	0.51	12.57

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-4:** Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Camiones Pequeños [14].

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
1110	21198	19	16	-3	-0.18	0.82
20093	20100	81	77	-4	-0.05	0.49
20099	20100	24	26	2	0.09	0.43
20102	20100	49	51	2	0.04	0.25
20143	90145	122	125	3	0.03	0.30
20149	90145	28	26	-2	-0.09	0.46
20153	90145	140	147	7	0.05	0.58
20154	90145	34	36	2	0.05	0.26
20319	20321	221	183	-38	-0.17	2.70
20327	20321	81	80	-1	-0.01	0.09
20327	20335	75	79	4	0.06	0.49
20334	20335	66	63	-3	-0.04	0.33

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
20336	20335	113	71	-42	-0.37	4.40
20342	20100	80	67	-13	-0.17	1.55
20384	90385	70	127	57	0.81	5.72
20386	90385	90	70	-20	-0.22	2.19
20392	90385	22	39	17	0.78	3.11
20404	90385	29	40	11	0.39	1.92
20446	20452	36	35	-1	-0.03	0.17
20449	20450	221	169	-52	-0.24	3.73
20465	20510	86	80	-6	-0.06	0.61
20473	20452	78	72	-6	-0.08	0.74
20492	20687	15	13	-2	-0.13	0.51
20509	20510	91	105	14	0.15	1.42
20540	20542	279	261	-18	-0.06	1.10
20544	20542	145	145	0	0.00	0.01
20545	20546	175	67	-108	-0.62	9.83
20549	20546	238	243	5	0.02	0.33
20580	20583	330	297	-33	-0.10	1.89
20602	20546	333	295	-38	-0.11	2.13
20602	20583	295	238	-57	-0.19	3.49
20603	20583	167	178	11	0.07	0.87
20606	20546	92	76	-16	-0.17	1.69
20614	22013	51	35	-16	-0.32	2.47
20640	22013	121	166	45	0.37	3.72
20644	22013	24	45	21	0.89	3.62
20680	21289	33	29	-4	-0.12	0.73
20685	20686	87	78	-9	-0.11	1.02
20691	20689	37	40	3	0.08	0.47
20695	20692	12	11	-1	-0.11	0.39
20696	20979	7	7	0	-0.05	0.13
20714	20987	3	4	1	0.28	0.46
20719	20987	5	4	-1	-0.23	0.54
20749	20689	40	34	-6	-0.16	1.07
20775	21009	27	23	-4	-0.15	0.81
20783	20787	46	41	-5	-0.12	0.82
20794	20787	25	25	0	0.00	0.00
20803	20785	30	34	4	0.14	0.72
20984	20979	9	6	-3	-0.31	1.02
20987	20988	6	8	2	0.27	0.61
20988	20987	12	9	-3	-0.28	1.05
20998	21001	31	22	-9	-0.29	1.75
21008	20775	48	46	-2	-0.05	0.33
21020	21018	55	62	7	0.13	0.95
21024	21018	66	88	22	0.33	2.46
21031	21018	72	1	-71	-0.99	11.83
21032	21044	48	41	-7	-0.14	0.98

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
21033	21044	22	26	4	0.17	0.76
21069	21075	134	152	18	0.13	1.48
21076	21075	27	25	-2	-0.08	0.40
21093	91120	130	122	-8	-0.06	0.74
21094	91120	73	51	-22	-0.31	2.85
21103	21104	60	79	19	0.32	2.32
21108	91120	71	54	-17	-0.24	2.16
21109	21198	17	22	5	0.27	1.06
21111	21104	37	17	-20	-0.53	3.78
21124	91120	103	91	-12	-0.12	1.25
21177	21001	16	16	0	0.02	0.06
21221	21198	31	35	4	0.12	0.67
21223	21262	8	8	0	0.04	0.11
21261	21262	45	38	-7	-0.16	1.15
21267	21262	25	40	15	0.59	2.58
21284	21282	59	72	13	0.22	1.62
21288	21289	16	10	-6	-0.40	1.79
21311	91313	52	52	0	0.00	0.00
21320	21282	10	10	0	-0.01	0.02
21337	91313	22	22	0	0.00	0.02
21448	91424	26	32	6	0.24	1.13
21463	21480	70	59	-11	-0.15	1.34
21479	21480	7	5	-2	-0.25	0.72
21565	91313	13	12	-1	-0.04	0.15
21568	21605	55	46	-9	-0.17	1.33
21603	21605	53	30	-23	-0.43	3.53
21604	91313	19	18	-1	-0.05	0.23
21611	21605	71	124	53	0.74	5.36
21676	21289	20	20	0	0.00	0.01
21702	20979	20	20	0	0.00	0.01
21727	20883	3	3	0	-0.05	0.08
21795	21315	21	32	11	0.54	2.20
21797	21315	8	8	0	0.00	0.01
21800	21315	6	6	0	0.01	0.02
21805	21315	15	15	0	-0.02	0.07
21825	21330	41	38	-3	-0.06	0.42
21842	21330	10	8	-2	-0.17	0.56
21845	21330	27	27	0	0.00	0.00
21914	20952	159	148	-11	-0.07	0.87
21922	20988	5	9	4	0.73	1.39
21950	21153	16	16	0	-0.01	0.03
21997	20952	141	103	-38	-0.27	3.48
22017	91424	23	22	-1	-0.05	0.25
22023	91424	75	60	-15	-0.20	1.83

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
22028	21480	98	93	-5	-0.05	0.55
22033	21282	31	34	3	0.10	0.57
22045	20452	29	27	-2	-0.05	0.29
22539	20583	349	313	-36	-0.10	2.00
25012	25011	145	139	-6	-0.04	0.49
25026	25027	132	76	-56	-0.42	5.45
25027	25026	172	144	-28	-0.16	2.20
25028	25029	15	21	6	0.40	1.42
25044	25045	20	80	60	2.99	8.46
25046	25045	26	40	14	0.53	2.40
25047	25048	3	18	15	5.01	4.64
25049	25050	38	32	-6	-0.16	1.03
25051	25050	46	40	-6	-0.12	0.84
25059	25058	115	66	-49	-0.43	5.14
25064	25065	30	35	5	0.17	0.87
25065	25064	187	161	-26	-0.14	1.96
25088	25112	35	44	9	0.27	1.50
25096	25097	15	33	18	1.21	3.70
25097	25096	96	58	-38	-0.40	4.39
25103	25104	45	41	-4	-0.08	0.55
25104	25103	56	72	16	0.29	2.00
25112	25088	41	64	23	0.55	3.14
25118	25119	25	24	-1	-0.06	0.29
25133	25134	24	24	0	0.00	0.02
25134	25133	8	10	2	0.24	0.65
25141	25140	111	106	-5	-0.04	0.47
25142	21282	43	43	0	0.00	0.00
25144	21262	21	17	-4	-0.21	1.02
90325	20321	162	172	10	0.06	0.78
90617	22013	76	56	-20	-0.27	2.49
91609	21605	247	206	-41	-0.17	2.74

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 6-5:** Indicadores de Bondad de la Calibración Modo Camiones Grandes [14].

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
20093	20100	25	19	-6	-0.23	1.21
20143	90145	71	83	12	0.17	1.41
20149	90145	10	16	6	0.62	1.71
20153	90145	65	62	-3	-0.05	0.43
20154	90145	1	1	0	0.21	0.20
20267	90291	10	11	1	0.09	0.28
20319	20321	45	48	3	0.08	0.50
20327	20321	12	15	3	0.25	0.80

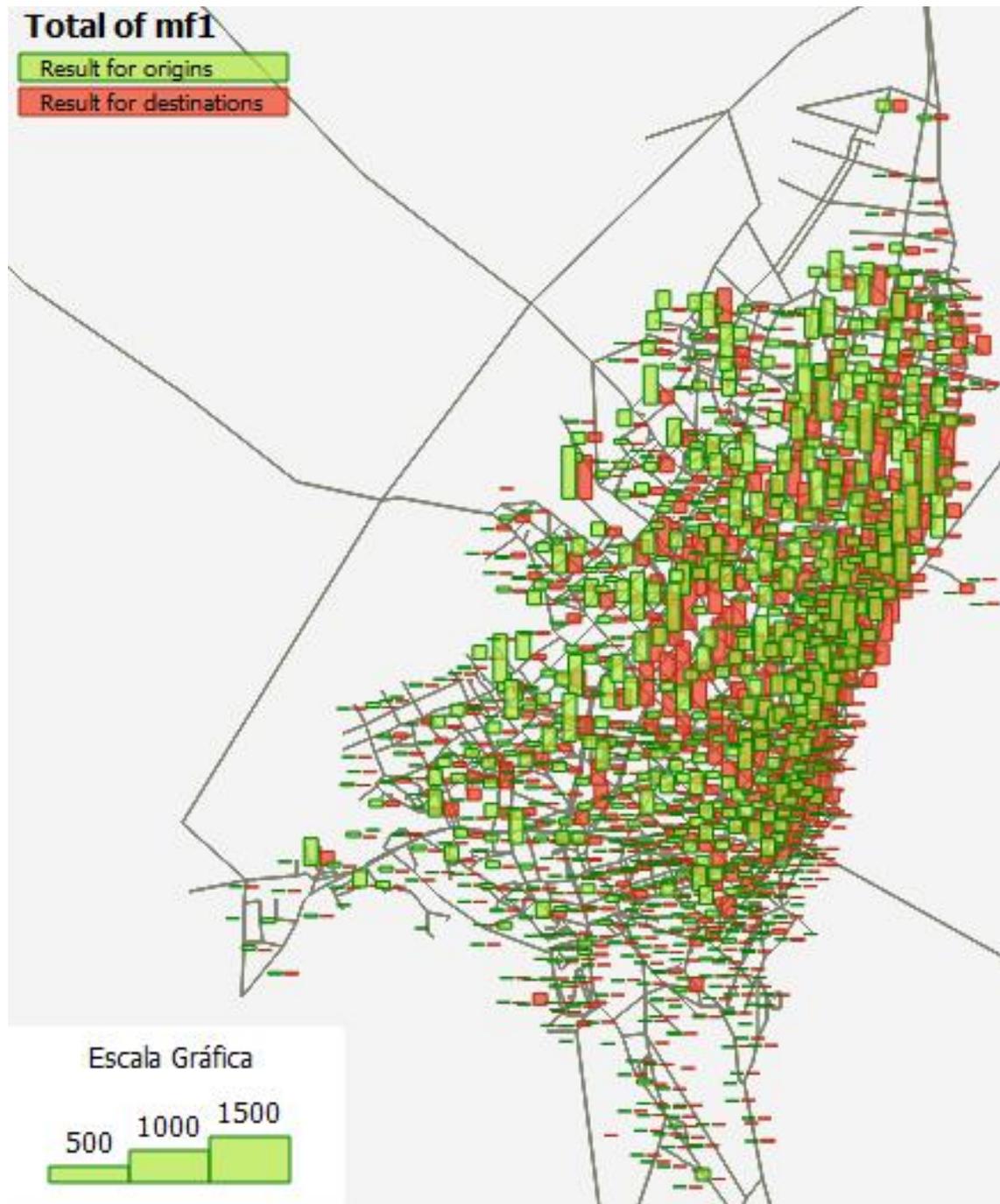
Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
20327	20335	1	2	1	0.80	0.67
20334	20335	7	4	-3	-0.43	1.30
20336	20335	17	14	-3	-0.20	0.85
20342	20100	12	19	7	0.61	1.84
20386	90385	11	19	8	0.70	2.00
20404	90385	10	12	2	0.17	0.52
20449	20450	37	28	-9	-0.23	1.49
20464	20510	57	52	-5	-0.09	0.69
20465	20510	3	1	-2	-0.50	1.00
20473	20452	7	12	5	0.66	1.52
20509	20510	3	3	0	-0.06	0.11
20515	20510	61	65	4	0.07	0.55
20538	20542	4	4	0	0.02	0.03
20540	20542	6	8	2	0.29	0.66
20544	20542	6	6	0	0.08	0.18
20545	20546	59	46	-13	-0.21	1.73
20548	20542	46	47	1	0.03	0.18
20549	20546	35	36	1	0.01	0.08
20580	20583	114	129	15	0.13	1.34
20602	20546	94	97	3	0.03	0.29
20602	20583	84	68	-16	-0.19	1.87
20603	20583	16	17	1	0.07	0.28
20606	20546	27	14	-13	-0.48	2.85
20640	22013	3	2	-1	-0.18	0.33
20691	20689	2	2	0	0.02	0.02
20775	21009	1	1	0	0.01	0.01
20783	20787	1	1	0	0.00	0.00
20794	20787	1	5	4	4.29	2.42
21008	20775	2	6	4	1.83	1.87
21024	21018	5	5	0	0.06	0.12
21031	21018	4	5	1	0.36	0.66
21069	21075	12	12	0	0.01	0.04
21093	91120	17	17	0	0.00	0.01
21094	21075	7	6	-1	-0.09	0.24
21094	91120	5	6	1	0.21	0.45
21108	91120	19	17	-2	-0.11	0.51
21463	21480	29	32	3	0.09	0.48
21603	21605	32	29	-3	-0.08	0.46
21611	21605	15	15	0	-0.01	0.02
22023	91424	5	4	-1	-0.11	0.26
22028	21480	6	6	0	-0.03	0.07
22045	20452	9	13	4	0.47	1.28
22539	20583	81	77	-4	-0.05	0.46
90325	20321	52	53	1	0.01	0.08

Nodo i	Nodo j	Aforados	Asignados	Diferencia (Asignados- Aforados)	Relación (Asignados/Aforados)	GEH
90617	22013	15	28	13	0.87	2.83
91609	21605	38	30	-8	-0.20	1.33

*Fuente: Elaboración propia.*

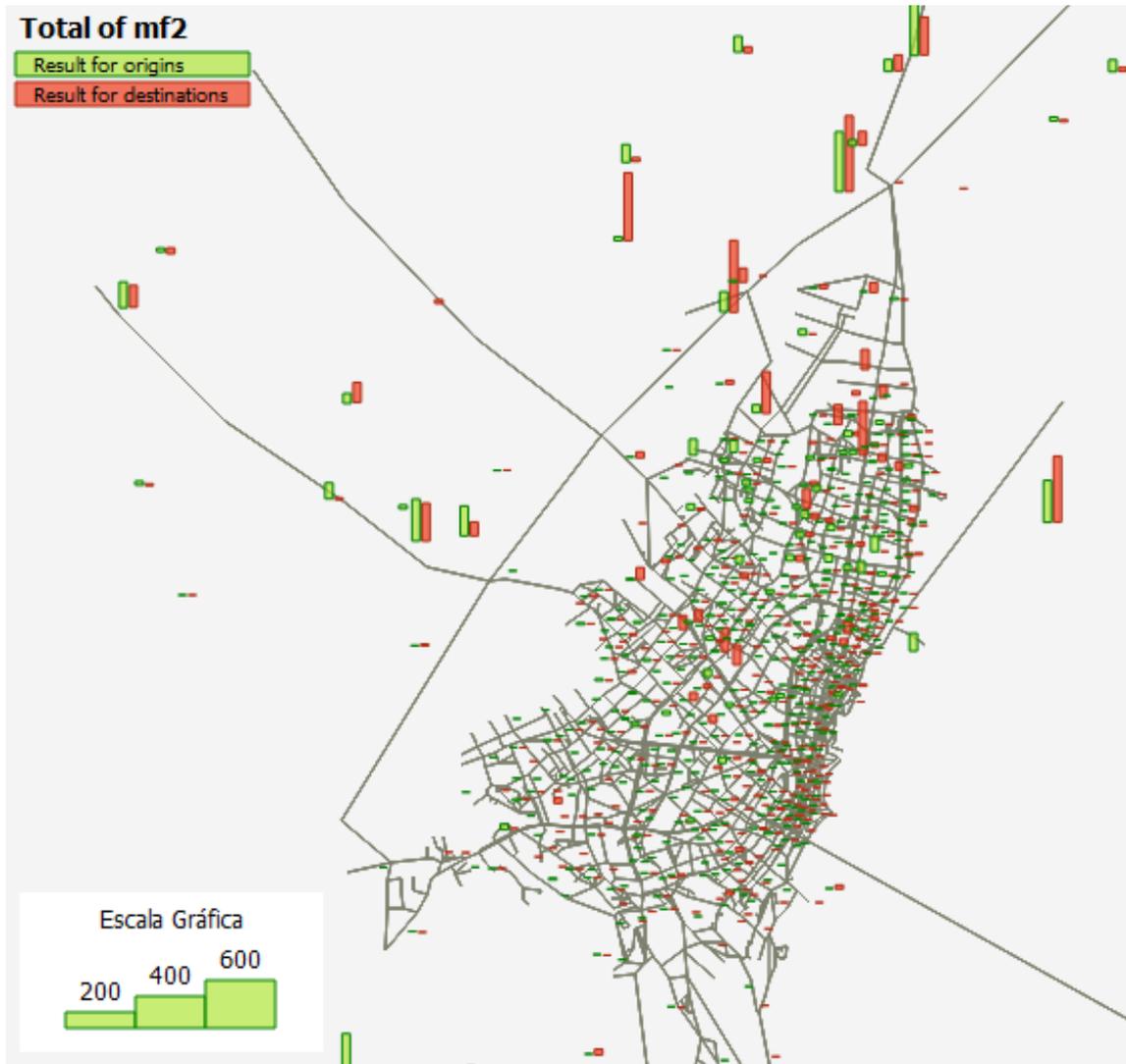
## Anexo B Representación Gráfica de Matrices Obtenidas del Proceso de Calibración

Figura 6-1: Matriz Calibrada de Viajes Urbanos en Vehículo Particular.



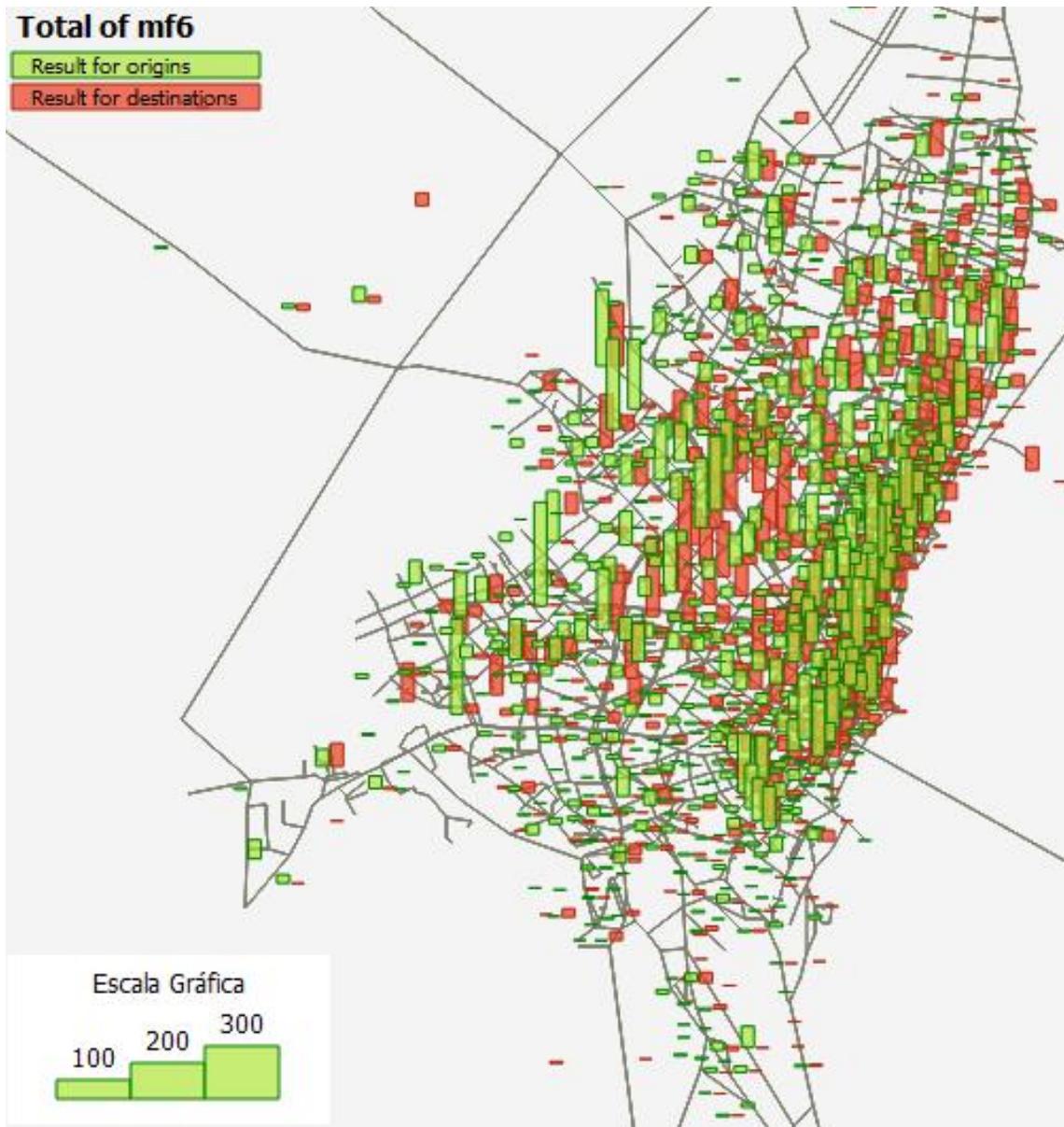
Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-2: Matriz Calibrada de Viajes Suburbanos en Vehículo Particular.



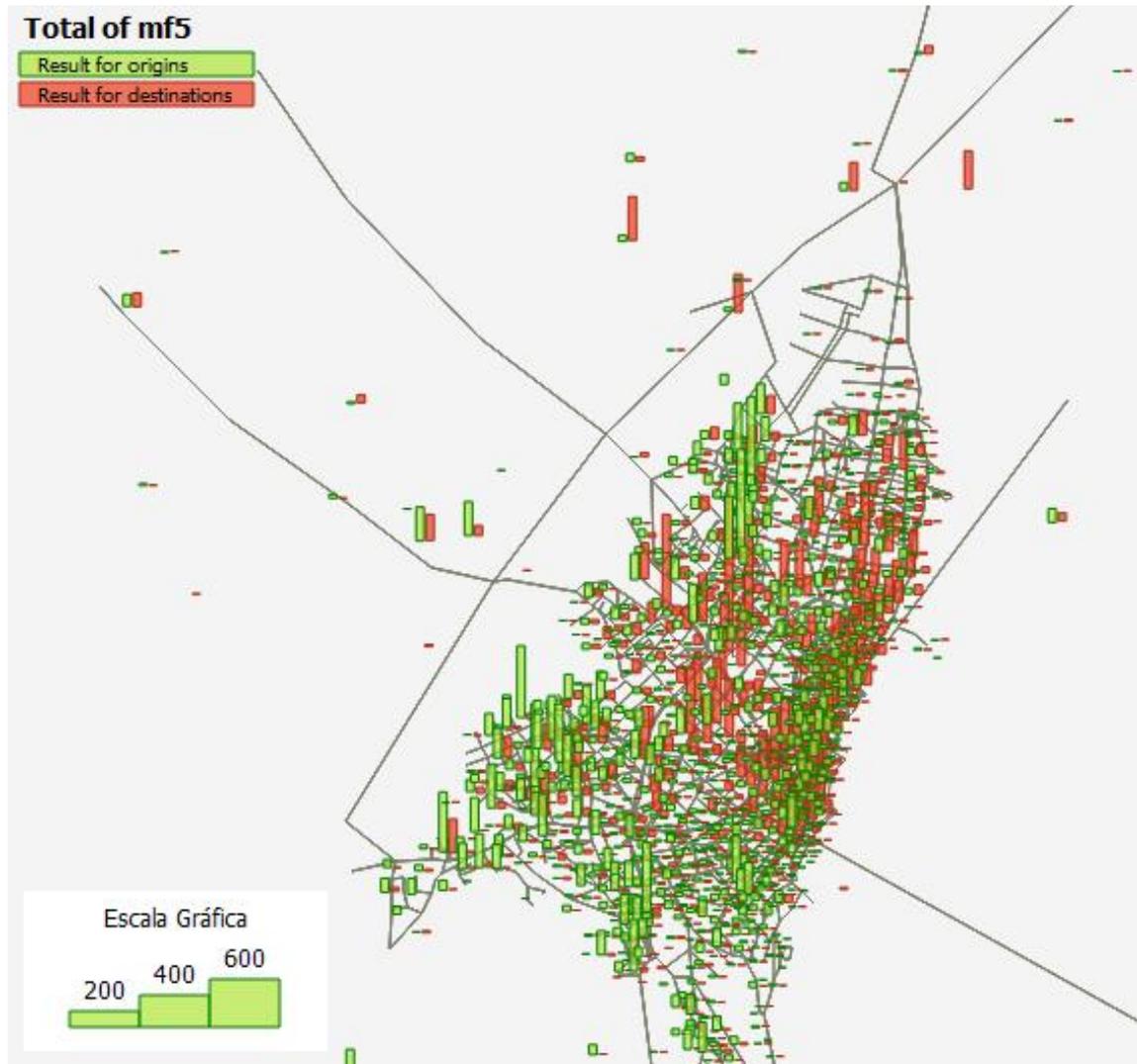
Fuente: Elaboración propia

**Figura 6-3:** Matriz Calibrada de Viajes en Taxi.



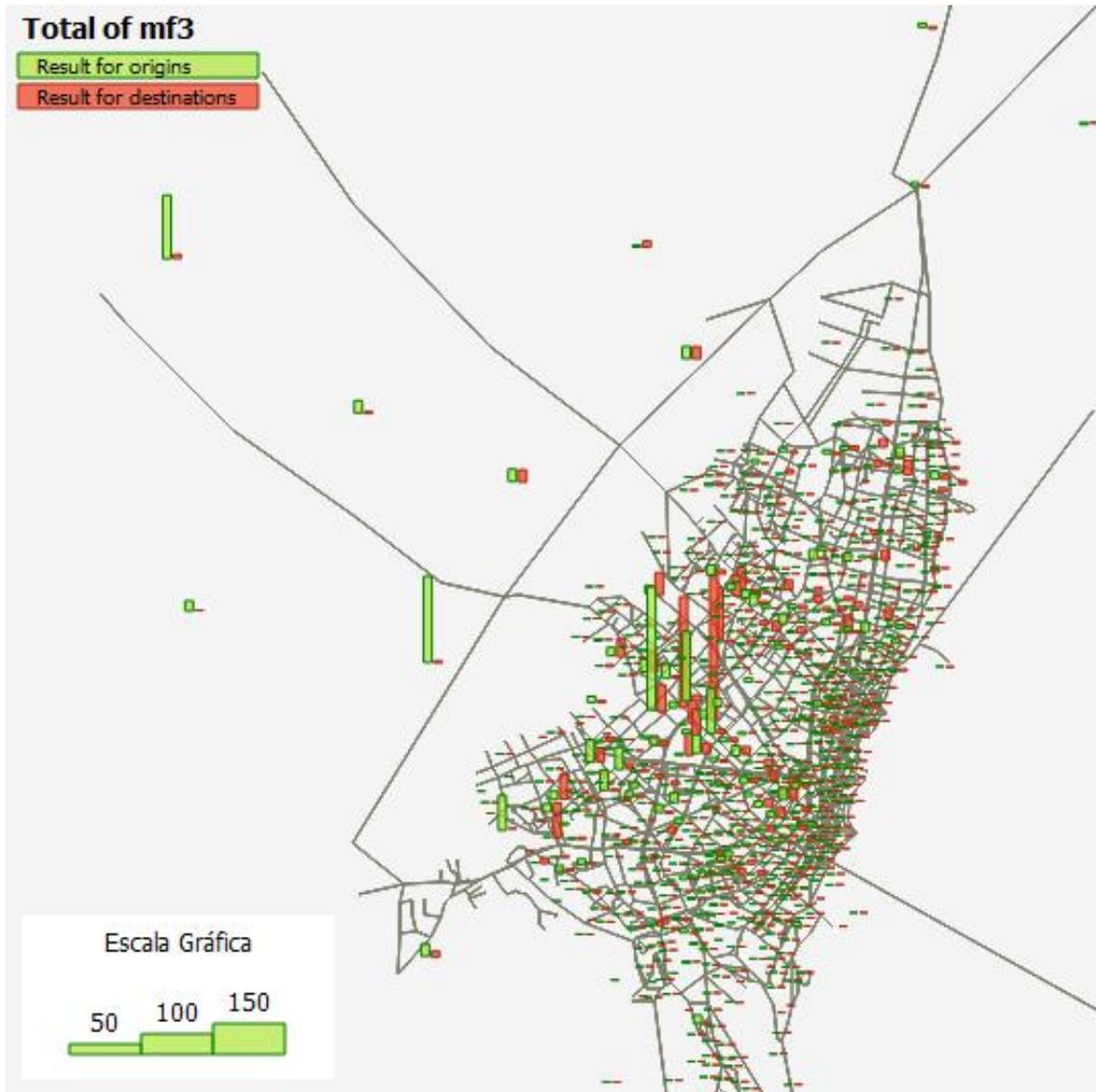
Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-4: Matriz Calibrada de Viajes en Motocicleta.



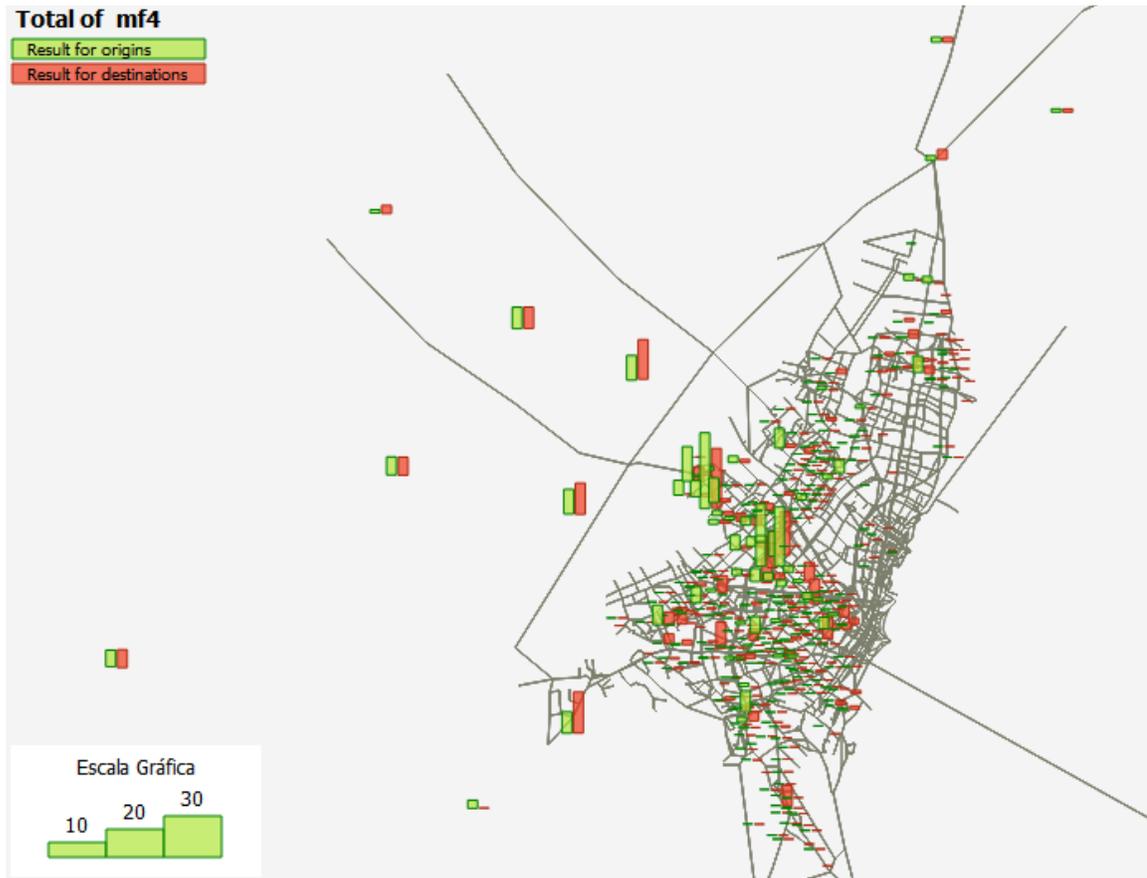
Fuente: Fuente: Elaboración propia.

**Figura 6-5:** Matriz Calibrada de Viajes de Camiones Pequeños.



Fuente: Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-6: Matriz Calibrada de Viajes de Camiones Grandes.



Fuente: Fuente: Elaboración propia.



## **Bibliografía**

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA - ANI. (S.F.). Tráfico y Recaudo, Recuperado en marzo de 2016, de [www.ani.gov.co](http://www.ani.gov.co).

AHME, A., YOUNGHAN, J. AND HESHAM, R. (2005). Developing Passenger Car Equivalency Factors for Heavy Vehicles during Congestion.

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. (2013). Decreto 520 de 2013. "Por el cual se establecen restricciones y condiciones para el tránsito de los vehículos de transporte de carga en el área urbana del Distrito Capital y se dictan otras disposiciones".

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. (2009). Decreto 540 de 2009. "Por la cual se fijan los recorridos y lineamientos dentro de la ciudad de Bogotá Distrito Capital, para el Servicio Público de Transporte Terrestre Automotor de Pasajeros por Carretera".

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. (2013). Decreto 575 DE 2013. "Por medio del cual se dictan disposiciones para el mejor ordenamiento del tránsito de vehículos automotores de servicio particular por las vías públicas en el Distrito Capital, y se derogan los Decretos Distritales 271 y 300 de 2012."

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. (2013). Decreto 690 de 2013. "Por medio del cual se modifica el Decreto 520 de 2013, que establece restricciones y condiciones para el tránsito de los vehículos de transporte de carga en el área urbana del Distrito Capital y se dictan otras disposiciones".

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C. (2014). Resolución 003 de 2014. "Por la cual se establecen los recorridos dentro del perímetro urbano de Bogotá D.C. para el servicio de

transporte público que sirve el corredor Soacha – Bogotá y viceversa y se dictan otras disposiciones”.

AL-QADI I., SAYED T., ALNUAMI N., AND MASAD E. (2009). Efficient Transportation and Pavement Systems. Characterization, Mechanisms, Simulation and Modeling. Editorial Taylor y Francis Group. London U. K. BOYCE, D., DAY, N. AND McDONALD, C. (1970). Metropolitan Plan Making, Regional Science Research Institute, Filadelfia.

BURRELL, J., y DICK AC. (1969). Mathematical models in urban transportation planning. CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ D.C. (2015). Reporte Anual de Movilidad 2014, Observatorio de Movilidad Bogotá y Región. No. 8 ISSN: 2027-209X.

CASCETTA, E. (2009). Transportation System Analysis, Models and Applications (Second ed.). Italy: Springer Science+Business Media.

CONARCON. (2012). Consultoría para el Pronóstico de Demanda e Ingresos para el Grupo de Concesiones Viales del Occidente de Bogotá: Concesión Sabana de Occidente, Concesiones CCFC S.A. y Concesionaria Panamericana.

DANE (2008). Proyecciones Municipales de Población 2006-2020. Bogotá D.C.

DEPARTMENT OF TRANSPORT. (1987). Values for Journey Time Savings and Accident Prevention. HMSO, Londres.

EURO WORKING GROUP ON TRANSPORTATION, MEETING, PATRIKSSON, M., y LABBÉ, M. (2002). Transportation planning state of the art. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers. Recuperado a partir de <http://public.ebib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=197817>.

JANSEN, G., BOVY, P. (1982). The Effect of Zone Size and Network Detail on all-or-Nothing and Equilibrium Assignment Outcome.

HELBING, D. (2001.) Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of modern physics*, 73(4), 1067.

HIGHWAYS ENGLAND. *The Design Manual for Roads and Bridges*. (2016). *Traffic Appraisal of Road Schemes*. CD ROM.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO – IDU. (2014). *Inventario y Diagnóstico de la Malla Vial Desarrollado en 2014*.

INSTITUTO DE INFRAESTRUCTURA Y CONCESIONES DE CUNDINAMARCA – ICCU (S.F.). *Tráfico y Recaudo*, Recuperado en marzo de 2016, de [www.cundinamarca.gov.co/](http://www.cundinamarca.gov.co/).

MÁRQUEZ, L., GARCÍA, D., y GUARÍN, L. (2014). Funciones volumen-demora BPR y cónica en vías multicarriles de Bogotá. *Revista de Ingeniería*, Universidad de Los Andes, 41. 30-39. 2014. <http://doi.org/0121-4993>

MOHAN, R., y RAMADURAI, G. (2013). State-of-the art of macroscopic traffic flow modelling. *Indian Institute of Technology Madras. International Journal Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*.158-176.

MOLINERO, A. R., y SÁNCHEZ ARELLANO, L. I. (2005). *Transporte Público: Planeación, Diseño, Operación y Administración*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.

ORTÚZAR, J. *Modelos de demanda de transporte*. (2000). Segunda Edición. México: Ediciones Universidad Católica de Chile. Alfaomega.

ORTÚZAR, S y WILLUMSEN, L. (2008). *Modelos de Transporte (Traducción Tercera Edición Inglesa)*. Chichester, Universidad de Cantabria.

ORTÚZAR, S. y WILLUMSEN, L. (2011). *Modelling Transport (Fourth edition)*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley y Sons.

SECRETARÍA DISTRITAL DE MOVILIDAD DE BOGOTÁ D.C. (2015). Encuesta de Movilidad para Bogotá.

SECRETARÍA DISTRITAL DE MOVILIDAD DE BOGOTÁ D.C. (2015) Programa de Monitoreo, Seguimiento y Planeación del Tránsito y el Transporte de Bogotá D.C.

SECRETARÍA DISTRITAL DE MOVILIDAD DE BOGOTÁ D.C. (2013). Cobros por Congestión 2013. Recuperado 29 de enero de 2016, a partir de <http://www.movilidadbogota.gov.co/?sec=567>.

SECRETARÍA DISTRITAL DE MOVILIDAD DE BOGOTÁ D.C. (2011). Encuesta de Movilidad para Bogotá.

SECRETARÍA DE TRÁNSITO Y TRANSPORTE DE BOGOTÁ. (2005). Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte.

SECRETARÍA DISTRITAL PLANEACIÓN DE BOGOTÁ D.C. (2015). Región metropolitana de Bogotá: una visión de la ocupación del suelo. Bogotá. Recuperado de <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/actualidad-SDP-home/REGION-digital.pdf>.

SECRETARÍA DISTRITAL PLANEACIÓN DE BOGOTÁ D.C. (2015). Bogotá Ciudad de Estadísticas 2014. Recuperado de [http://www.sdp.gov.co/imagenes\\_portal/documentacion/OficPrensa/Boletin\\_Resultados\\_Encuesta\\_Multiproposito\\_2014.pdf](http://www.sdp.gov.co/imagenes_portal/documentacion/OficPrensa/Boletin_Resultados_Encuesta_Multiproposito_2014.pdf)

SECRETARÍA DISTRITAL DE PLANEACIÓN DE BOGOTÁ D.C. (2014). Bogotá Ciudad de Estadísticas 2014.

SHARMINDA, B. AND KRISHNA, R. (2011). Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art.

SMITH J. AND BLEWITT R. (2010). Traffic Modeling Guidelines, TFL Traffic Manager and Network Performance Best Practice. Tercera Edición. Transport for London.

SOKOLOWSKI John A. BANKS Catherine. (2012). Handbook of Real-World Applications in Modeling and Simulation. Editorial Wiley. Estados Unidos y Canadá.

STEER DAVIES GLEAVE. (2014). Primera Línea de Metro de Bogotá.

THOMAS, E., y SCHOFER JL. (1970). Strategies For The Evaluation Of Alternative Transportation Plans. Highw Res bd, national cooperative highway research program rep 96.

TRANSMILENIO. (S.F.). Sistema Transmilenio S.A. Recuperado en marzo de 2010, de [www.transmilenio.gov.co](http://www.transmilenio.gov.co).

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB). (2000). Highway Capacity Manual. Washington D.C.

WOOTTON, H. AND NESS, M. AND BURTON, R. (1981). Improved Direction of Signs and the Benefits for Road Users.

YANG, H. AND ZHOU, J. (1998). Optimal traffic counting locations for origin-destination matrix estimation.