



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Lineamientos generales para el diseño de rutas troncales en el Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá**

**John Vicente Moreno Triviño**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2020



# **Lineamientos generales para el diseño de rutas troncales en el Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá**

**John Vicente Moreno Triviño**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería - Transporte**

Director:

Ing. MSc. William Castro García

Línea de Investigación:

Planificación y Modelamiento de Transporte Público

Grupo de Investigación:

Programa de Investigación en Transporte, Movilidad y Territorio

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2020



*Una movilidad digna y de alta calidad es un derecho fundamental para cualquier ciudadano de este inmenso mundo... Siempre debería valer la pena vivir la experiencia de cada viaje.*

*Pensamiento del autor*



## Agradecimientos

En primer lugar deseo agradecer al ing. William Castro García, director de esta tesis y profesor asociado de la Universidad Nacional de Colombia. Sin su apoyo incondicional y guía académica, esta investigación no habría sido posible. Además, su aporte en este trabajo es inestimable, así como el respeto a la independencia como investigador que siempre me ofreció.

De la misma forma, agradezco a la firma consultora GSD Plus de Bogotá, en cabeza de su gerente, ing. Fabio Gordillo. Su colaboración ha sido esencial: el tema de esta tesis fue inspirado en una charla informal con el ing. Gordillo, GSD Plus es una de las mejores escuelas que he tenido, y adicionalmente, ha sido posible hacer uso de los recursos de software de la compañía.

Igualmente, manifiesto mi más sincero agradecimiento a TransMilenio S.A. por el tiempo prestado para atender mis inquietudes y la valiosa información suministrada para la elaboración de esta tesis. Este trabajo busca contribuir con un pequeño grano de arena a la magnífica labor que esta entidad realiza cada día por la movilidad de los bogotanos.

Agradezco también a mis padres Graciela y Vicente, y mi hermano Camilo, por su apoyo constante en la consecución de esta meta. Sin una base familiar unida y fuerte, recorrer este camino hubiera sido a otro precio.

Por último, y sobre todo, agradezco a mi prometida, Andrea Martínez, por su apoyo, paciencia, y comprensión. Así como por las eternas horas escuchando mis monólogos sobre esta investigación. Todo el tiempo robado será devuelto con creces. Este trabajo es nuestro.



## Resumen

El objetivo es establecer lineamientos generales para el diseño de la red de rutas troncales en el SITP de Bogotá, en cuanto a trazados geográficos, puntos de parada y frecuencias. Se contempló la demanda de hábil típico en hora punta AM, antes del COVID-19. La investigación tuvo tres fases: elaboración del estado del arte (literatura, casos internacionales, entrevistas a expertos) para establecer los principios rectores de diseño de rutas en TransMilenio, y proponer algunos lineamientos candidatos; desarrollo de una metodología para evaluar distintos escenarios de rutas, basándose en un modelo de transporte; aplicación de dicha metodología para cuantificar el impacto operacional de los lineamientos candidatos, escogiendo así las mejores filosofías de diseño. Los resultados pueden dividirse en dos categorías. 1) Procesos heurísticos para el diseño sistemático de rutas en el sistema BRT. 2) Lineamientos seleccionados para el diseño de rutas en TransMilenio. Entre las conclusiones, se tiene que los servicios deberían diseñarse con un enfoque multicriterio, lo que implica una red de rutas relativamente compleja. Se ha probado que una red de rutas muy simplificada no es conveniente. Por otra parte, en el corto plazo se recomienda mantener el diseño de rutas diametrales. Sin embargo, en el mediano plazo el paradigma debe evolucionar hacia el diseño de rutas radiales. Este enfoque permitiría reducir notoriamente la flota mínima requerida, mejorando los intervalos de paso, aumentando la comodidad dentro de los buses y/o reduciendo la inversión en material rodante. Además, se ha mostrado que el enfoque de rutas radiales precisaría de cuatro nuevas estaciones centrales de intercambio en Bogotá.

**Palabras clave:** diseño, rutas, TransMilenio, BRT, SITP, modelación, transporte.

## Abstract

The objective is to establish general guidelines for the design of the trunk route network in the Bogotá SITP, in terms of geographical layouts, stop points and frequencies. The demand for the morning rush hour in a typical business day, before COVID-19, was contemplated. The research had three phases: elaboration of the state of the art (literature, international cases, interviews with experts) to establish the guiding principles of routes design in TransMilenio and propose some candidate guidelines; development of a methodology to evaluate different routes scenarios, based on a transport model; application of this methodology to quantify the operational impact of the candidate guidelines, thus choosing the best alternatives. The outputs can be divided into two categories. 1) Heuristic processes for the systematic design of routes in the BRT system. 2) Selected guidelines for the design of routes in TransMilenio. Among the conclusions, the services should be designed with a multi-criteria approach, which implies a relatively complex route network. A very simplified route network has proven to be inconvenient. On the other hand, in the short term it is recommended to maintain the design of diametrical routes. However, in the medium term the paradigm must evolve to radial routes design. This approach would make it possible to significantly reduce the minimum required fleet, improving headways, increasing comfort within buses and / or reducing investment in rolling stock. Furthermore, it has been shown that the radial routes approach would require four new interchange central stations in Bogotá.

**Keywords: design, routes, TransMilenio, BRT, SITP, modeling, transportation.**

# Contenido

	PÁG.
RESUMEN .....	IX
CONTENIDO.....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XIV
LISTA DE TABLAS .....	XVII
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS .....	XVIII
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>1. ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>3</b>
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	3
1.1.1 <i>Diagnóstico de las rutas actuales del componente troncal</i> .....	3
1.1.2 <i>Justificación e implicaciones</i> .....	5
1.2 LITERATURA SOBRE DISEÑO DE RUTAS EN SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO.....	6
1.2.1 <i>Problema de Diseño de la Red de Rutas en el Transporte Público</i> .....	8
1.2.2 <i>Problema de selección de puntos de parada en el transporte público</i> .....	12
1.2.3 <i>Problema de asignación de frecuencias en el transporte público</i> .....	13
1.2.4 <i>Documentos técnicos y legales aplicables al caso de Bogotá</i> .....	15
1.3 ESTUDIO DE CASOS INTERNACIONALES .....	16
1.4 ENTREVISTAS A EXPERTOS NACIONALES E INTERNACIONALES.....	18
1.5 REVISIÓN DE PAQUETES DE SOFTWARE DE MODELACIÓN DE TRANSPORTE.....	23
<b>2. PRINCIPIOS RECTORES PARA EL DISEÑO DE LA RED RUTAS TRONCALES EN EL SITP DE BOGOTÁ .....</b>	<b>25</b>
2.1 PRINCIPIOS RECTORES COMO AXIOMAS .....	25
2.1.1 <i>Primer principio</i> .....	27
2.1.2 <i>Segundo principio</i> .....	28
2.1.3 <i>Tercer principio</i> .....	28
2.1.4 <i>Cuarto principio</i> .....	29
2.1.5 <i>Quinto principio</i> .....	29
2.1.6 <i>Otros principios</i> .....	30
2.1.7 <i>Resumen tabular de los principios</i> .....	31
2.2 LINEAMIENTOS CANDIDATOS PARA EL DISEÑO DE RUTAS TRONCALES .....	32
2.2.1 <i>Primer grupo de lineamientos: filosofía de diseño simple</i> .....	33
2.2.2 <i>Segundo grupo de lineamientos: filosofía de diseño multicriterio</i> .....	34
2.2.3 <i>Tercer grupo de lineamientos: filosofía de diseño radial</i> .....	36

2.2.4	<i>Cuarto grupo de lineamientos: filosofía de diseño diametral</i> .....	38
2.3	CONJUNTOS CANDIDATOS DE LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DE RUTAS TRONCALES .....	39
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA PARA CUANTIFICAR EL IMPACTO OPERACIONAL DE LOS LINEAMIENTOS</b> .....	<b>43</b>
3.1	DEFINICIÓN DE VARIABLES OPERACIONALES Y FUNCIONES OBJETIVO .....	44
3.1.1	<i>Variables operacionales</i> .....	44
3.1.2	<i>Funciones objetivo</i> .....	46
3.1.3	<i>Configuración de los parámetros de la función de impedancia</i> .....	49
3.2	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE .....	51
3.2.1	<i>Red vial</i> .....	52
3.2.2	<i>Estaciones del componente troncal</i> .....	53
3.2.3	<i>Zonas de transporte y conectores</i> .....	54
3.3	MATRIZ ORIGEN-DESTINO DEL COMPONENTE TRONCAL .....	55
3.3.1	<i>Fuentes de información base</i> .....	55
3.3.2	<i>Proceso para la construcción de la matriz</i> .....	56
3.3.3	<i>Matriz resultante</i> .....	62
3.4	GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE SIMULACIÓN .....	67
3.4.1	<i>Heurística para el diseño de las redes de rutas troncales</i> .....	68
3.4.2	<i>Escenario 0: red de rutas 2020</i> .....	84
3.4.3	<i>Escenario 1: rutas radiales con enfoque de diseño simple</i> .....	87
3.4.4	<i>Escenario 2: rutas diametrales con enfoque de diseño simple</i> .....	88
3.4.5	<i>Escenario 3: rutas radiales con enfoque de diseño multicriterio</i> .....	91
3.4.6	<i>Escenario 4: rutas diametrales con enfoque de diseño multicriterio</i> .....	99
3.4.7	<i>Escenario 5: rutas con diferentes lineamientos</i> .....	104
3.5	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ASIGNACIÓN DE VIAJES .....	108
3.5.1	<i>Calibración del submodelo</i> .....	108
3.5.2	<i>Metodología iterativa para la asignación de viajes</i> .....	109
<b>4.</b>	<b>CUANTIFICACIÓN DEL IMPACTO OPERACIONAL Y LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE RUTAS</b> .....	<b>115</b>
4.1	CASOS DE SIMULACIÓN Y RESULTADOS CUANTIFICADOS .....	116
4.2	ANÁLISIS DEL IMPACTO OPERACIONAL DE LOS CONJUNTOS DE LINEAMIENTOS .....	122
4.2.1	<i>Casos de simulación 1, 2 y 3</i> .....	123
4.2.2	<i>Casos de simulación 4, 5 y 6</i> .....	129
4.3	LINEAMIENTOS GENERALES PARA EL DISEÑO DE LA RED DE RUTAS TRONCALES EN EL SITP .....	132
4.3.1	<i>Lineamientos sobre los trazados geográficos</i> .....	132
4.3.2	<i>Lineamientos sobre los puntos de parada</i> .....	136
4.3.3	<i>Lineamientos sobre las frecuencias</i> .....	141
4.4	CONSIDERACIONES SOBRE EL USO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN AL USUARIO .....	143
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>145</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	146
5.2	RESUMEN TABULAR DE LOS LINEAMIENTOS PARA EL DISEÑO DE LA RED DE RUTAS EN EL COMPONENTE TRONCAL DEL SITP	147
5.3	ALCANCE, LIMITACIONES Y TEMAS ABIERTOS PARA EL FUTURO .....	149
<b>A.</b>	<b>ANEXO: RESULTADOS CARTOGRÁFICOS DE LOS CASOS DE SIMULACIÓN Y SUS ESCENARIOS.</b> .....	<b>153</b>

---

A.1 RESULTADOS DEL CASO 1: TRANSBORDOS CON PENALIZACIÓN BAJA E INFORMACIÓN DE SALIDAS EN PLATAFORMA .....	154
A.2 RESULTADOS DEL CASO 2: TRANSBORDOS CON PENALIZACIÓN MEDIA E INFORMACIÓN DE SALIDAS EN PLATAFORMA.....	157
A.3 RESULTADOS DEL CASO 3: TRANSBORDOS CON PENALIZACIÓN ALTA E INFORMACIÓN DE SALIDAS EN PLATAFORMA .....	160
A.4 RESULTADOS DEL CASO 4: TRANSBORDOS CON PENALIZACIÓN BAJA E INFORMACIÓN COMPLETA PARA EL USUARIO.....	163
A.5 RESULTADOS DEL CASO 5: TRANSBORDOS CON PENALIZACIÓN INTERMEDIA E INFORMACIÓN COMPLETA PARA EL USUARIO .....	165
A.6 RESULTADOS DEL CASO 6: TRANSBORDOS CON PENALIZACIÓN ALTA E INFORMACIÓN COMPLETA PARA EL USUARIO .....	167
<b>B. ANEXO: DETALLE DEL ESTUDIO DE CASOS INTERNACIONALES .....</b>	<b>169</b>
B.1 SANTIAGO DE CHILE .....	169
B.1 LIMA, PERÚ.....	182
<b>C. ANEXO: DETALLES DE LAS ENTREVISTAS A EXPERTOS NACIONALES E INTERNACIONALES .....</b>	<b>195</b>
C.1 SOBRE LAS PROBLEMÁTICAS DEL SISTEMA TRONCAL .....	198
C.2 SOBRE LAS ACCIONES DE MEJORA DE CORTO PLAZO.....	200
C.3 SOBRE UN NUEVO CORREDOR DE TRANSPORTE MASIVO .....	202
C.4 SOBRE PRINCIPIOS RECTORES PARA DISEÑO DE RUTAS .....	204
C.5 SOBRE CAMBIOS EN PRO DE LA MEJORA DEL SERVICIO .....	208
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>211</b>

## Lista de figuras

	PÁG.
<b>Figura 1-1:</b> Nube de palabras con los conceptos clave obtenidos durante las entrevistas .....	22
<b>Figura 2-1:</b> Esquema conceptual para la obtención de los principios rectores.....	26
<b>Figura 2-2:</b> Esquema conceptual para la obtención de los lineamientos candidatos .....	32
<b>Figura 2-3:</b> Plano cartesiano de lineamientos para el diseño de rutas.....	40
<b>Figura 3-1:</b> Metodología para cuantificar el impacto operacional de los lineamientos.....	43
<b>Figura 3-2:</b> Red vial del modelo de transporte de la red troncal de TransMilenio en 2020. .....	52
<b>Figura 3-3:</b> Portales, estaciones y paraderos de la red troncal de TransMilenio en 2020. .....	53
<b>Figura 3-4:</b> Zonas y conectores del modelo de transporte.....	54
<b>Figura 3-5:</b> Diagrama de flujo para el cálculo de la matriz interna de la red troncal.....	56
<b>Figura 3-6:</b> Equivalencia geográfica entre las estaciones de la Cr. 10 y la Av. Caracas.	59
<b>Figura 3-7:</b> Regresión lineal de viajes generados por estación en la matriz semilla y validaciones de torniquetes en hora punta AM.....	60
<b>Figura 3-8:</b> Regresión lineal de viajes atraídos por estación en la matriz semilla y salidas de torniquetes en hora punta AM .....	60
<b>Figura 3-9:</b> Origen y destinos de los viajes en el componente troncal hora punta AM....	62
<b>Figura 3-10:</b> Origen de los viajes en los corredores Autonorte y Av. Suba, y destinos ...	63
<b>Figura 3-11:</b> Origen de los viajes en los corredores Calle 80 y Calle 26, y destinos.....	64
<b>Figura 3-12:</b> Origen de los viajes en los corredores Av. Américas y Autosur, y destinos	65
<b>Figura 3-13:</b> Origen de los viajes en los corredores Av. Caracas Sur y Cr. 10, y destinos .....	66
<b>Figura 3-14:</b> Distribución temporal de las validaciones troncales y duales hora punta AM .....	67
<b>Figura 3-15:</b> Diagrama de flujo de alto nivel de la heurística para el diseño de las redes de rutas en los escenarios correspondientes a los distintos conjuntos de lineamientos. .	69
<b>Figura 3-16:</b> Diagrama de flujo de la heurística para el diseño de trazados geográficos de rutas radiales con enfoque de diseño simple. ....	71
<b>Figura 3-17:</b> Zonas de destino y retornos operativos de la red troncal de TransMilenio.	72
<b>Figura 3-18:</b> Asignaciones de viajes con las matrices filtradas por corredor de origen...	74
<b>Figura 3-19:</b> Diagrama de flujo de la heurística para la asignación de puntos de parada en rutas radiales con enfoque de diseño simple.....	76

<b>Figura 3-20:</b> Regresión para portales y estaciones intermedias .....	82
<b>Figura 3-21:</b> Regresión para estaciones del centro ampliado .....	83
<b>Figura 3-22:</b> Regresión para estaciones de los corredores de origen .....	84
<b>Figura 3-23:</b> Red de rutas troncales de TransMilenio a febrero de 2020 .....	85
<b>Figura 3-24:</b> Red de rutas duales de TransMilenio a febrero de 2020 .....	86
<b>Figura 3-25:</b> Red de rutas radiales con enfoque de diseño simple.....	87
<b>Figura 3-26:</b> Proceso heurístico para la generación de la red de rutas del escenario 2 .	89
<b>Figura 3-27:</b> Red de rutas diametrales con enfoque de diseño simple.....	90
<b>Figura 3-28:</b> Proceso heurístico para la generación de la red de rutas del escenario 3 .	92
<b>Figura 3-29:</b> Diagrama de flujo de la heurística para la asignación de puntos de parada en rutas radiales con enfoque de diseño multicriterio .....	93
<b>Figura 3-30:</b> Regresión para portales y estaciones intermedias .....	96
<b>Figura 3-31:</b> Regresión para estaciones del centro ampliado .....	97
<b>Figura 3-32:</b> Regresión para estaciones de los corredores de origen .....	97
<b>Figura 3-33:</b> Red de rutas radiales con enfoque de diseño multicriterio.....	98
<b>Figura 3-34:</b> Proceso heurístico para la generación de la red de rutas del escenario 4	100
<b>Figura 3-35:</b> Red de rutas diametrales con enfoque de diseño multicriterio.....	103
<b>Figura 3-36:</b> Red de rutas radiales con enfoque de diseño simple.....	104
<b>Figura 3-37:</b> Red de rutas con diferentes lineamientos.....	107
<b>Figura 3-38:</b> Calibración del modelo de transporte a nivel de estaciones y paraderos duales. ....	109
<b>Figura 3-39:</b> Proceso iterativo para el submodelo de asignación de viajes. ....	110
<b>Figura 4-1:</b> Estructura de los casos de simulación.....	116
<b>Figura 4-2:</b> Volumen de pasajeros por arco en el caso 2, escenario 0 -red de rutas 2020- .....	119
<b>Figura 4-3:</b> Usuarios totales por estación en el caso 2, escenario 0 -red de rutas 2020- .....	120
<b>Figura 4-4:</b> Tiempo de transbordo total por estación en el caso 2, escenario 0 -red de rutas 2020- .....	121
<b>Figura 4-5:</b> Tiempos de viaje percibidos, casos 1, 2 y 3. ....	126
<b>Figura 4-6:</b> Flota mínima requerida, casos 1, 2 y 3.....	128
<b>Figura 4-7:</b> Tiempos de viaje percibidos: SIU actuales vs. SIU mejorados .....	129
<b>Figura 4-8:</b> Tiempos de viaje “reales”: SIU actuales vs. SIU mejorados .....	130
<b>Figura 4-9:</b> Viajes con uno o menos transbordos: SIU actuales vs. SIU mejorados.....	130
<b>Figura 4-10:</b> Flota mínima requerida: SIU actuales vs. SIU mejorados.....	131
<b>Figura 4-11:</b> Ubicación de los retornos operacionales a priorizar en el centro ampliado. .....	135
<b>Figura 4-12:</b> Ejemplo de dos servicios superexpresos del escenario 4.....	137
<b>Figura 4-13:</b> Zonas de destino y retornos operativos de la red troncal de TransMilenio. .....	139
<b>Figura 4-14:</b> Ubicación de las estaciones centrales recomendadas.....	141
<b>Figura 4-15:</b> Distribución Porcentual de los intervalos de paso de las rutas por escenario .....	143
<b>Figura A-1:</b> Volumen de pasajeros por arco en el caso 1 .....	154

<b>Figura A-2:</b> Usuarios totales por estación en el caso 1 .....	155
<b>Figura A-3:</b> Tiempo de transbordo total por estación en el caso 1.....	156
<b>Figura A-4:</b> Volumen de pasajeros por arco en el caso 2.....	157
<b>Figura A-5:</b> Usuarios totales por estación en el caso 2 .....	158
<b>Figura A-6:</b> Tiempo de transbordo total por estación en el caso 2.....	159
<b>Figura A-7:</b> Volumen de pasajeros por arco en el caso 3.....	160
<b>Figura A-8:</b> Usuarios totales por estación en el caso 3 .....	161
<b>Figura A-9:</b> Tiempo de transbordo total por estación en el caso 3.....	162
<b>Figura A-10:</b> Volumen de pasajeros por arco en el caso 4.....	163
<b>Figura A-11:</b> Usuarios totales y tiempo de transbordo total por estación en el caso 4..	164
<b>Figura A-12:</b> Volumen de pasajeros por arco en el caso 5.....	165
<b>Figura A-13:</b> Usuarios totales y tiempo de transbordo total por estación en el caso 5..	166
<b>Figura A-14:</b> Volumen de pasajeros por arco en el caso 6.....	167
<b>Figura A-15:</b> Usuarios totales y tiempo de transbordo total por estación en el caso 6..	168
<b>Figura B-1:</b> Núcleo urbano de Santiago de Chile .....	170
<b>Figura B-2:</b> Red de Metro y MetroTren, Santiago de Chile.....	172
<b>Figura B-3:</b> Servicios largos por unidad de negocio de Red Metropolitana de Movilidad .....	172
<b>Figura B-4:</b> Servicios colectores por unidad de negocio de Red Metropolitana de Movilidad.....	173
<b>Figura B-5:</b> Ejemplos de servicios de buses operativos actualmente, derivados de servicios “clon” del Metro de Santiago .....	176
<b>Figura B-6:</b> Ubicación de las EIM en Santiago de Chile .....	178
<b>Figura B-7:</b> Estación Intermodal La Cisterna y sus servicios de transporte .....	179
<b>Figura B-8:</b> Vías prioritarias y exclusivas de la Red Metropolitana de Movilidad .....	181
<b>Figura B-9:</b> Lima Metropolitana y ampliación del núcleo urbano principal. ....	183
<b>Figura B-10:</b> Núcleo urbano principal de Lima Metropolitana. ....	184
<b>Figura B-11:</b> Línea 1 del Metro de Lima y BRT Metropolitano.....	186
<b>Figura B-12:</b> Servicios troncales Metropolitano de Lima .....	187
<b>Figura B-13:</b> Servicios Superexpresos Metropolitano de Lima. ....	190
<b>Figura B-14:</b> Servicios Expresos hora punta AM Norte-Sur Metropolitano de Lima.....	190
<b>Figura B-15:</b> Mapa de los Corredores Complementarios de Lima a 25 de julio de 2019. ....	192

## Lista de tablas

	PÁG.
<b>Tabla 1-1:</b> Comparativa entre Bogotá, Santiago y Lima .....	17
<b>Tabla 1-2:</b> Expertos entrevistados en orden cronológico.....	19
<b>Tabla 1-3:</b> Resumen de las respuestas a la pregunta 1 .....	20
<b>Tabla 1-4:</b> Resumen de las respuestas a la pregunta 2 .....	20
<b>Tabla 1-5:</b> Resumen de las respuestas a la pregunta 3 .....	21
<b>Tabla 1-6:</b> Resumen de las respuestas a la pregunta 4 .....	21
<b>Tabla 1-7:</b> Resumen de las respuestas a la pregunta 5 .....	22
<b>Tabla 2-1:</b> Principios rectores para el Problema de Diseño de la Red de Rutas en el componente troncal del SITP .....	31
<b>Tabla 3-1:</b> Combinaciones de rutas fusionadas para el escenario 2 .....	91
<b>Tabla 3-2:</b> Corredores de origen y destino para las rutas fusionadas del escenario 4...101	101
<b>Tabla 3-3:</b> Distribución de rutas radiales y diametrales en el escenario 5 .....	106
<b>Tabla 3-4:</b> Corredores de origen y destino con conexión directa en el escenario 5.....106	106
<b>Tabla 4-1:</b> Resultados cuantificados de los casos y escenarios de redes de rutas.....118	118
<b>Tabla 4-2:</b> Resumen de los 6 escenarios de redes de rutas generados .....	122
<b>Tabla 4-3:</b> Resultados cuantificados del caso 1: penalización baja de los transbordos .123	123
<b>Tabla 4-4:</b> Resultados cuantificados del caso 2: penalización media de los transbordos .....124	124
<b>Tabla 4-5:</b> Resultados cuantificados del caso 3: penalización alta de los transbordos ..125	125
<b>Tabla 5-1:</b> Lineamientos generales para el diseño de rutas troncales en el SITP .....	147

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad	Definición
$a_{acc}$	Factor de ponderación para el tiempo de acceso	-	Ecuación (3.1)
$a_{esp}$	Factor de ponderación para el tiempo de espera	-	Ecuación (3.1)
$a_T$	Factor de ponderación para la tarifa	-	Ecuación (3.1)
$a_{trans}$	Factor de ponderación para el tiempo de transbordo	-	Ecuación (3.1)
$a_v$	Factor de ponderación para el tiempo de viaje	-	Ecuación (3.1)
$a_{wait trans}$	Factor de ponderación para el tiempo de espera en un transbordo	-	Ecuación (3.4)
$a_{walk trans}$	Factor de ponderación para el tiempo de caminata entre estaciones de transbordo	-	Ecuación (3.4)
$C_c$	Costo de los conductores por unidad de transporte	$\frac{\$}{bus}$	Subsección 3.1.1
$C_{km}$	Costo por kilómetro	$\frac{\$}{Km}$	Subsección 3.1.1
$C_p$	Costo del área de patios requerida por unidad de transporte	$\frac{\$}{bus}$	Subsección 3.1.1
$C_r$	Costo por unidad de transporte en ralentí por unidad de tiempo	$\frac{\$}{bus.min}$	Subsección 3.1.1
$Cap_{bus}$	Capacidad de una tipología de bus	sillas	Ecuación (3.19)
$Cap_{min}$	Capacidad mínima de las unidades de transporte	sillas	Ecuación (3.15)

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad</b>	<b>Definición</b>
$F_{max}$	Frecuencia máxima ideal de diseño por ruta	$\frac{buses}{h}$	Ecuación (3.15)
$F_U$	Función generalizada de costo del usuario	min	Ecuación (3.1)
$Flota_{ruta}$	Cantidad de buses requeridos para satisfacer la demanda de una ruta	buses	Ecuación (3.20)
$I_{paso}$	Intervalo de paso de una ruta	min	Ecuación (3.19)
$I_{paso\ ajus}$	Intervalo de paso ajustado de cada ruta	min	Ecuación (3.21)
$N_f$	Número de unidades de transporte	buses	Subsección 3.1.1
$N_{f\ art}$	Número requerido de buses articulados de 160 pasajeros	buses	Ecuación (3.3)
$N_{f\ biart}$	Número requerido de buses biarticulados de 240 pasajeros	buses	Ecuación (3.3)
$N_{f\ dual}$	Número requerido de buses duales de 80 pasajeros	buses	Ecuación (3.3)
$N_{pl}$	Número de total plazas	sillas	Ecuación (3.3)
$N_{trans}$	Número de transbordos	transbordos	Ecuación (3.4)
$NR_{max\ corredor}$	Número máximo de rutas en un corredor	rutas	Ecuación (3.15)
$NR_{min\ est\ atr}$	Número mínimo de rutas que deben parar en una estación atractora	rutas	Ecuación (3.16)
$NR_{min\ est\ gen}$	Número mínimo de rutas que deben parar en una estación generadora	rutas	Ecuación (3.15)
$P_{trans}$	Penalización por transbordo	$\frac{min}{transbordo}$	Ecuación (3.4)
$Sal_{est}$	Salidas de una estación	usuarios	Ecuación (3.13)
$T$	Tarifa del servicio	\$	Ecuación (3.1)
$t_{acc}$	Tiempo de acceso	min	Ecuación (3.1)
$t_{ciclo}$	Tiempo de ciclo -ida y vuelta- de una ruta	min	Ecuación (3.20)
$t_{esp}$	Tiempo de espera	min	Ecuación (3.1)

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad</b>	<b>Definición</b>
$t_{trans}$	Tiempo de transbordo	min	Ecuación (3.4)
$t_v$	Tiempo de viaje	min	Ecuación (3.1)
$t_{wait\ trans}$	Tiempo de espera en el transbordo	min	Ecuación (3.4)
$t_{walk\ trans}$	Tiempo de caminata para el transbordo	min	Ecuación (3.4)
$Val_{est}$	Validaciones en una estación	usuarios	Ecuación (3.13)
$Vol_{max}$	Volumen máximo de pasajeros en una ruta	pasajeros	Ecuación (3.19)

## Abreviaturas

### Abreviatura Término

BRT	Autobús de tránsito rápido
PLMB	Primera Línea del Metro de Bogotá
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá
SITP	Sistema Integrado de Transporte Público
SIU	Sistemas de información al usuario
TRNDP	Problema de diseño de la red de rutas en el transporte público
ZAT	Zonas de análisis de transporte de Bogotá

# Introducción

El diseño de la red de rutas en el transporte público es un problema cuya solución puede afectar significativamente algunos aspectos del servicio. Si bien existe cierta cantidad de literatura que aborda este tema desde el punto de vista teórico, no es tan común encontrar estudios aplicados a la vida real, y aún menos frecuente es encontrar trabajos integrales de este tópico enfocados en sistemas BRT, tales como Transmilenio.

Por lo tanto, la presente investigación tratará de llenar un poco el vacío existente en cuanto a estudios formales relacionados con el diseño de servicios en sistemas BRT. Específicamente, el objetivo principal es “Establecer lineamientos generales para el diseño de la red de rutas troncales en el Sistema Integrado de Transporte Público -SITP- de Bogotá, como mínimo en cuanto a trazados geográficos, puntos de parada y frecuencias”. Su importancia radica en que se requiere buscar soluciones innovadoras que permitan optimizar, aún más, el uso de los recursos disponibles para mejorar los niveles de servicio ofrecidos al usuario. Esto toma aún más relevancia teniendo en cuenta que, antes de la pandemia por el COVID-19, la troncal de TransMilenio soportaba una alta cantidad de viajes en hora punta, y por ende, históricamente los niveles de sobresaturación han sido evidentes.

Para cumplir el objetivo principal se han formulado tres objetivos específicos, cada uno desarrollado en una etapa distinta de la investigación. El primero fue establecer los principios rectores que deben tenerse en consideración al momento de generar lineamientos para el diseño de la red rutas troncales en el SITP. Estos principios rectores constituyen los axiomas sobre los cuales se ha basado el trabajo aquí desarrollado. Para alcanzar esta primera meta se ha realizado una revisión de literatura sobre el tema, un estudio de dos casos internacionales sobre diseño de rutas en sistemas BRT: Santiago y Lima, y 12 entrevistas a reconocidos expertos nacionales e internacionales, que han estado asociados con la concepción, diseño y funcionamiento de distintos sistemas BRT. El detalle de esta primera etapa puede consultarse en los capítulos 1 y 2 del presente

libro. Además, en el capítulo 2 se han generado 6 conjuntos candidatos de lineamientos que fueron puestos a prueba durante el proceso investigativo. Estos conjuntos candidatos surgen de la combinación de 4 filosofías de diseño de rutas: diseño simple, diseño multicriterio, diseño radial y diseño diametral.

El segundo objetivo específico consistió en desarrollar una metodología como herramienta para cuantificar el impacto operacional de los diversos conjuntos candidatos de lineamientos. Para tal fin, se ha construido un modelo de transporte simplificado de la red troncal de TransMilenio, incluyendo la formulación de una función objetivo para la evaluación de escenarios, la estimación de una matriz de viajes internos de la troncal – submodelos de generación y atracción, y distribución por Fratar –, y la implementación de 6 escenarios de simulación, uno por cada conjunto de lineamientos. En el capítulo 3 se puede encontrar lo referente a esta segunda etapa, en la cual también se han desarrollado algunos procesos heurísticos para el diseño sistemático de redes de rutas, y se ha establecido un proceso iterativo para el submodelo de asignación de viajes.

El tercer objetivo específico ha sido cuantificar el impacto operacional de los conjuntos candidatos de lineamientos aplicados al diseño de rutas en TransMilenio. En pro de lograrlo, se han ejecutado 27 casos de simulación dentro del modelo de transporte. En cada uno de estos casos se ha calculado la función de impedancia para el usuario y la flota mínima requerida para atender la demanda. Esto puede verse en capítulo 4, en el que, además, se encuentra el análisis del impacto operacional de los conjuntos candidatos de lineamientos y sus filosofías de diseño asociadas. Adicionalmente, en este mismo capítulo se han seleccionado y explicado los lineamientos generales que proporcionan los mejores resultados para el caso de Bogotá, dando cumplimiento al objetivo general de la investigación.

Finalmente, en el capítulo 5 se han presentado las conclusiones, alcance, limitaciones y temas abiertos para el futuro. En resumen, la presente investigación contribuye con unos procesos heurísticos para el diseño sistemático de rutas troncales y una metodología para la evaluación de distintos lineamientos de diseño. Así mismo, define cuales son las filosofías de diseño que deberían primar en Bogotá, lo cual será útil para quienes participan en la planeación del sistema TransMilenio, constituyendo también un marco de referencia para la replicación de la metodología en otras ciudades.

# **1.Estado del arte**

Para iniciar este capítulo se ha desarrollado un breve diagnóstico de las rutas actuales en el componente troncal del SITP, y se han justificado la importancia y las implicaciones del problema de investigación.

A continuación, se ha elaborado un estado del arte desde tres perspectivas para establecer los principios rectores que deben guiar el diseño de rutas. En la primera perspectiva se ha documentado literatura relacionada con el problema de diseño de rutas en sistemas de transporte público en general, y se han revisado los documentos técnicos más relevantes que sustentan el desarrollo del sistema de transporte en Bogotá. La segunda perspectiva corresponde al estudio de dos casos internacionales que por sus características puedan asemejarse al caso de interés. En el tercer eje se han realizado entrevistas a expertos que conocen de primera mano el caso particular de Bogotá, y de cuyas apreciaciones se ha beneficiado esta investigación.

Finalmente, y de manera adicional, se ha realizado una revisión de los paquetes de software de modelación de transporte disponibles en el mercado, escogiéndose uno de ellos para la presente investigación.

## **1.1 Antecedentes y justificación**

Se presenta a continuación un diagnóstico del tema de interés y su justificación.

### **1.1.1 Diagnóstico de las rutas actuales del componente troncal**

El sistema BRT de la ciudad de Bogotá, conocido como Transmilenio y que constituye el componente troncal del SITP, movilizaba aproximadamente 2,4 millones de pasajeros durante un día hábil típico -antes de la pandemia por el COVID-19- [1]; y tiene 138

estaciones, 9 portales y 9 corredores troncales [2] por los que diariamente transitan buses biarticulados -240 pasajeros por bus-, articulados -160 pasajeros por bus- y duales -80 pasajeros por bus-. Adicionalmente, cuenta con interconectores elevados, deprimidos, semaforizados y peatonales que permiten que tanto buses como pasajeros hagan cambios de línea troncal. Las diferentes rutas del componente troncal [3] conectan la ciudad de sur a norte por su franja oriental, y conectan las zonas occidentales con el centro ampliado en el oriente mediante ramales de la troncal. Para mediados de 2020, aún estaba pendiente la tarea de cerrar el circuito de infraestructura troncal por el borde occidental de la ciudad.

La extensión geográfica del sistema, la configuración de los corredores troncales, el gran número de estaciones y la disposición de los deseos de viaje dentro de la ciudad han ocasionado que la red de rutas del componente troncal del SITP tenga algunas características particulares:

- Existe un gran número de rutas dentro del sistema, su organización y sus nombres son complejos y pueden llevar a la confusión a algunos de los usuarios: esto, a su vez, puede ocasionar que la elección de rutas que hacen los viajeros no obedezca a condiciones racionales de optimización del tiempo de viaje [4] debido a que los usuarios no pueden calcular fácilmente sus recorridos óptimos y la información de la cual disponen puede ser compleja de manejar.
- Los trazados geográficos de las rutas no necesariamente responden a las necesidades de viaje de una parte de los usuarios, obligándolos a tomar por caminos que no son óptimos ni naturales: por ejemplo, un usuario que parta del suroccidente y quiera llegar a la zona norte, puede verse obligado a cruzar por el centro de la ciudad puesto que las rutas que tiene a su disposición lo obligan a hacerlo de este modo. Valga la pena añadir que el diseño de las rutas de la troncal está condicionado por la infraestructura existente.
- Es posible que los paraderos de algunas rutas no se ajusten a las necesidades de los usuarios y causen retardos en la operación, al concentrar demasiadas unidades transportadoras deteniéndose en los mismos puntos: un ejemplo es el caso, en hora punta AM, en el cual un bus completamente lleno de pasajeros se

detiene en una estación intermedia, en la cual un número insignificante de los pasajeros a bordo desciende. Además, muy pocos de los usuarios que esperan el servicio pueden abordarlo por el alto nivel de ocupación con el que ya viene. Este problema puede verse exacerbado por el tiempo que toman este tipo de paradas, tiempo que puede ser de varios minutos mientras los buses hacen la respectiva fila para detenerse en una estación atiborrada y los pasajeros tratan de abordar infructuosamente.

- La planeación, programación y operación de las rutas del componente troncal puede ser un proceso extremadamente complejo debido al tamaño intrínseco del problema, cuyos resultados no siempre pueden corresponderse con la demanda presente en el sistema en ciertos momentos del día: es posible observar que a veces algunas rutas se llenan mucho más que otras, pero que las frecuencias de paso de los buses no se corresponden con esta realidad. Otras veces, puede observarse que transitan varios servicios de una misma ruta en un corto intervalo de tiempo y que después, no se presenta ningún bus a cubrir el recorrido durante un intervalo considerablemente amplio, alargando así el tiempo de espera de los usuarios al no cumplirse las frecuencias programadas en la operación. En otras ocasiones puede suceder que estaciones que cuentan con gran demanda de pasajeros no están servidas por un número suficiente de buses. Todo esto puede llevar a que los usuarios tomen decisiones de viaje que no necesariamente son las más eficientes, sino que se ven obligados a ello porque la oferta de transporte percibida los empuja a abordar las rutas que pasan más seguido, las que paran en su estación de origen o simplemente, el primer bus que pasa con el suficiente espacio como para abordarlo, así no sea de la ruta que mejor optimice sus tiempos de viaje.

### **1.1.2 Justificación e implicaciones**

El componente troncal del SITP constituye actualmente la columna vertebral de la movilidad en Bogotá. Más allá de sus cualidades o problemáticas, la sostenibilidad del sistema es fundamental para garantizar el correcto desarrollo de casi cualquier actividad en la ciudad. Esta sostenibilidad es el resultado de una combinación de gran cantidad de factores relacionados con diversas áreas del conocimiento, entre ellas, la planeación de

transporte es una de las ramas que más pueden influir en el desempeño del componente troncal.

Particularmente, el diseño de rutas en sistemas BRT, enmarcado como uno de los pasos dentro de la planeación, no es un tema que haya sido estudiado extensamente. Las referencias bibliográficas y los estudios aplicados a la vida real no son muchos. Existe entonces un vacío que podría dificultar la implementación de una red de rutas eficiente para afrontar el reto de movilizar millones de pasajeros al día en un sistema de transporte complejo, pero aún incompleto.

Es por esto por lo que se justifica y se plantea la urgente necesidad de contar con análisis y modelaciones, regidos bajo unos principios rectores lógicos y consistentes, que puedan generar lineamientos generales para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP. Estos lineamientos deben implicar un beneficio a los usuarios mediante un mejor uso de los recursos disponibles, tanto de infraestructura -vías, estaciones, interconectores, portales- como operativos -buses, conductores-, de modo que se puedan mejorar los tiempos percibidos de viaje y disminuir el requerimiento de flota.

## **1.2 Literatura sobre diseño de rutas en sistemas de transporte público**

El diseño integral de una ruta de transporte público implica determinar, como mínimo, los siguientes aspectos [5]:

- Trazado geográfico sobre la red vial.
- La ubicación de los puntos de parada.
- El tiempo de ciclo de cada recorrido a lo largo de su horario de operación.
- La tipología de las unidades transportadoras.
- Los intervalos de paso a lo largo de su horario de operación.

La literatura relacionada con los dos primeros puntos será materia de las dos subsecciones siguientes. El tercer punto no será tratado, puesto que establecer el detalle de los tiempos de ciclo de una ruta hace parte de un problema de corte estadístico que se encuentra fuera del alcance de la presente investigación. Además, la duración de los

tiempos de ciclo es altamente dependiente del trazado geográfico seleccionado y los puntos de parada establecidos. Así que, manteniendo otras variables como constantes dentro de un sistema (tipologías, tiempos de acceso a las unidades de transporte, pago antes o después de abordar, infraestructura en paraderos), es posible establecer una buena aproximación de los tiempos de ciclo conociendo el trazado de una ruta y el detalle de sus puntos de parada.

El cuarto punto tampoco será contemplado. Por un lado, puede considerarse como una entrada para el problema del quinto punto en el cual se define la capacidad transportadora de una ruta, y por otro lado, la determinación de la tipología de la unidad de transporte de una ruta está relacionado con estudios sobre la geometría de la red vial y estudios económicos de factibilidad que están más allá del alcance aquí establecido. En la tercera subsección se hablará de la literatura relacionada con el quinto punto sobre estimación de los intervalos de paso. Finalmente, en la cuarta subsección se hará un recuento de los estudios técnicos y documentos legales que sustentan el futuro desarrollo de infraestructura de transporte en Bogotá.

Antes de entrar en materia, es necesario agradecer a los siguientes docentes e investigadores de la Red Académica de Movilidad “RAM Colombia”, quienes aportaron en gran medida a la consolidación de este estado del arte, al responder por medio de correo electrónico la consulta hecha por el investigador sobre fuentes en la literatura académica relacionadas con el tema de la presente tesis:

- **Doctora Flor Angela Cerquera**, Ing. Transporte y Vías, Docente Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- **Doctor Iván Reinaldo Sarmiento**, Ing. Civil, Director del Grupo de investigaciones en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- **Magister Santiago Henao Pérez**, Ing. Industrial, Profesor Titular Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- **Magister Thomas E. Guerrero**, Ing. Civil, Docente Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.
- **Doctor Víctor Cantillo**, Ing. Civil, Profesor Titular Universidad del Norte.

### **1.2.1 Problema de Diseño de la Red de Rutas en el Transporte Público**

Una red de rutas puede considerarse el conjunto de servicios cuyos trazados geográficos conectan diferentes zonas dentro un sistema de transporte. El diseño de la red de rutas constituye el primer paso en el proceso de planeación de la operación en el transporte público [5]. A lo largo del tiempo, se han aplicado de manera extensiva directrices prácticas para afrontar el problema de su diseño, sin embargo, diversas investigaciones han argumentado que solamente la aplicación de reglas empíricas puede no conducir al establecimiento de soluciones eficientes [6], sino que por el contrario, es preferible la aplicación de procesos sistemáticos e integrados [7].

Una de las fuentes que ha sido tomada como base para la elaboración del presente estado del arte es el artículo elaborado por Kepaptsoglou y Karlaftis en 2009 [6], en el cual de manera sistemática presentan y revisan investigaciones previamente hechas por otros autores sobre el Problema de Diseño de la Red de Rutas en el Transporte Público (TRNDP, por sus siglas en inglés). En su artículo, proponen la organización de la literatura revisada en tres niveles: según los objetivos de diseño, los parámetros operacionales o la metodología usada para la resolución del problema. En cuanto a objetivos de diseño plantean que existen básicamente dos grandes metas, minimizar los costos del usuario y minimizar los costos para el sistema de transporte. A su vez, esto deriva en que las investigaciones realizadas puedan ser, más o menos, clasificadas en alguna de estas cinco categorías, según su objetivo:

- Maximización del beneficio al usuario, Lee y Vuchic 2005 [8], Zhao y Zeng 2006 [9].
- Minimización del costo operativo, Ceder e Israeli 2007 [10], Morlok y Viton 1984 [11].
- Maximización del bienestar total, Fan y Machemehl 2006 [12], Zhao y Zeng 2007 [13].
- Maximización de la capacidad de transporte, Morlok y Viton 1984 [11], Van Nes et al. 1988 [14].
- Conservación de la energía – protección del medio ambiente, Delle y Filippi 2001 [15].

En lo relacionado a la clasificación de las investigaciones sobre TRNDP según sus parámetros operacionales, los autores del artículo establecen que diversos investigadores han tomado decisiones sobre los siguientes tópicos al momento de plantear sus trabajos:

- Variables de decisión prioritarias: los trabajos encontrados suelen enfocarse en el desarrollo de trazados geográficos óptimos y/o en la determinación de las frecuencias, Fan y Machemehl 2006 [12], Zhao y Zeng 2007 [13]. Es posible encontrar también estudios sobre el esquema de tarifas, Morlok y Viton 1984 [11]; las zonas de transporte, Chang y Schonfeld 1993 [16]; la ubicación de los puntos de parada, Van Nes 2003 [17]; o la tipología de los buses, Cipriani et al. 2005 [18].
- Estructura de la red: estructuras radiales, Morlok y Viton 1984 [11]; rectangulares, Chang y Schonfeld 1993 [16]; irregulares, Fan y Machemehl 2006 [12], Zhao y Zeng 2007 [13]; o sin forma definida Van Nes 2003 [17], Cipriani et al. 2005 [18].
- Patrones de la demanda: distribución de los puntos de origen y destino de los viajes dentro de la red. Comúnmente se lidia con problemas en los cuales, desde algunos orígenes, los usuarios viajan a un solo destino, Morlok y Viton 1984 [11], Chang y Schonfeld 1993 [16]; o problemas multiorigen y multidespino, Fan y Machemehl 2006 [12], Zhao y Zeng 2007 [13]; u otros en los cuales no existen claras zonas generadoras o atractoras de viajes.
- Características de la demanda: según la complejidad del problema y las decisiones de diseño tomadas, es posible considerar que la demanda es fija, Zhao y Zeng 2007 [13], Tom y Mohan 2003 [19]; o variable en el tiempo y/o en el espacio, Van Nes 2003 [17], Cipriani et al. 2005 [18]. Además, la demanda puede ser elástica Lee y Vuchic 2005 [8], Fan y Machemehl 2006 [12]; o inelástica, Morlok y Viton 1984 [11], Chakroborty y Dwivedi 2002 [20], en el entendido de que se puede considerar o no una variación en el total de viajes dentro del sistema de transporte según se modifiquen sus niveles de servicio.

- Estrategias operacionales: las diferentes investigaciones pueden incluir estrategias de diseño de la red de rutas, tales como incluir servicios de refuerzo, interlineados, viajes en vacío para retomar trayectos, entre otros.

Finalmente, Kepaptsoglou y Karlaftis realizan una clasificación de la literatura según la metodología usada para afrontar el TRNDP. Establecen que existen dos corrientes básicas, los métodos convencionales y los heurísticos. Los primeros (Morlok y Viton 1984 [11], Van Nes et al. 1988 [14], Delle y Filippi 2001 [15], Chang y Schonfeld 1993 [16], Van Nes 2003 [17]) incluyen los métodos analíticos y los que involucran algún tipo de programación matemática. Sin embargo, aclaran que estos métodos, por su alta complejidad y por su carácter combinatorio y multiobjetivo, solo son adecuados para problemas donde se requiere generar políticas generales, más no diseños completos de detalle, y que en general, son solo de interés teórico.

Así que el enfoque heurístico se convierte en la metodología dominante para afrontar problemas de la vida real utilizando una capacidad de cómputo razonable. Los autores describen dos caminos que habitualmente son seguidos en diversas investigaciones. El primero de estos, que es el enfoque más común en la mayoría de los modelos y **el que se ha adoptado en esta investigación**, consiste en los siguientes pasos a grandes rasgos:

- Procesos previos de consolidación de datos de demanda, información de la red vial y fijación de restricciones.
- Generación de un conjunto de rutas candidatas mediante procesos heurísticos basados en algoritmos, tales como determinación de caminos más cortos Lee y Vuchic 2005 [8], Ceder e Israeli 2007 [10], Tom y Mohan 2003 [19]; o de adición incremental de nodos según análisis de demanda, Chakroborty y Dwivedi 2002 [20]; existiendo restricciones operacionales predefinidas que deben ser satisfechas.
- Configuración de rutas mediante procesos en los cuales iterativamente se determinan frecuencias y se asignan demandas, se seleccionan las mejores rutas según indicadores previamente definidos, se mejoran las rutas

seleccionadas y se retoma el ciclo. Estas iteraciones pueden realizarse con algoritmos heurísticos tradicionales Lee y Vuchic 2005 [8], Ceder e Israeli 2007 [10]; metaheurísticos, Zhao y Zeng 2007 [13]; o combinaciones de los dos tipos, Zhao y Zeng 2006 [9], Fan y Machemehl 2006 [12], Cipriani et al. 2005 [18], Tom y Mohan 2003 [19], Chakroborty y Dwivedi 2002 [20].

- Selección final del conjunto óptimo de rutas y sus frecuencias asociadas.

El segundo camino posible en el enfoque heurístico se compone básicamente de los siguientes pasos:

- Procesos previos de consolidación de datos de demanda, información de la red vial y fijación de restricciones.
- Construcción directa del conjunto de rutas mediante un proceso heurístico que tenga en cuenta las restricciones operacionales y que puede estar basado en consideraciones geográficas y el flujo de la demanda de viajes, Carrese y Gori 2002 [21]; o en algoritmos de colonia de hormigas, Hu et al. 2005 [22], Yu y Yang 2006 [23], Yang et al. 2007 [24].
- Mejoramiento del conjunto de rutas existente, si aplica. Este mejoramiento se puede hacer mediante la agregación de cambios incrementales que busquen la optimización de una o múltiples variables de interés dentro del sistema, Carrese y Gori 2002 [21], Mandl 1980 [25].
- Selección final del conjunto óptimo de rutas y sus frecuencias asociadas.

En el capítulo 2 del presente libro se definirán los objetivos de diseño en la forma de principios rectores y lineamientos candidatos. Mientras que, en el capítulo 3, se presentará la función objetivo correspondiente, las decisiones relativas a variables operacionales, y el tipo de metodología que se utilizará en la investigación.

Dentro de los estudios mencionados en párrafos anteriores, uno de los autores más citados es A. Ceder, quien tiene una amplia colección de publicaciones relacionadas con

el TRNDP, de las cuales algunas ya se han citado en las páginas precedentes. Sin embargo, su libro de 2007 "*Public Transit Planning and Operation*" [5] constituye todo un compendio que debería ser tenido en cuenta por todo aquel que se encuentre diseñando y operando sistemas de transporte público. Esta obra será citada varias veces a lo largo de este trabajo. Específicamente, en lo concerniente al diseño de la red de rutas, este libro contiene cinco capítulos en los cuales se aborda directamente el tema. En el capítulo 12 se establecen funciones objetivo desde las perspectivas de los usuarios, los operadores de transporte y las agencias gubernamentales. En el capítulo 13 se introducen elementos para el diseño de los servicios y en el capítulo 14 se entra de lleno al diseño de redes de rutas al presentar una metodología heurística que se pone en práctica con un ejemplo en el cual se desea encontrar soluciones cercanas al óptimo utilizando una técnica de búsqueda multiobjetivo. Mientras tanto, el capítulo 15 ilustra conceptos relativos al diseño de servicios de refuerzo y el capítulo 16 presenta estrategias para el diseño de rutas alimentadoras.

Otra obra de referencia que se tendrá muy en cuenta en esta investigación es el trabajo de I. Norambuena, "Diseño Óptimo de Sistemas de Transporte Público Urbano" [26]. Este libro tiene como objetivo principal la formulación de una heurística que permita obtener una estructura de rutas eficiente para el sistema de transporte público de una ciudad. El autor formula varias heurísticas para luego realizar su implementación computacional y mostrar los resultados obtenidos para corredores de transporte en Santiago de Chile.

### **1.2.2 Problema de selección de puntos de parada en el transporte público**

La elección de los puntos de parada de una ruta cuyo trazado geográfico ya se encuentra definido es uno de los problemas que más atención ha recibido en los últimos años debido al interés por generar servicios expresos eficientes (servicios que no se detienen en todas las paradas a lo largo de su recorrido), particularmente en sistemas BRT. Ejemplos de ello pueden encontrarse en los trabajos de Larraín y Muñoz, quienes, junto a otros investigadores y fundamentados en modelos de optimización matemática, han publicado estudios sobre el diseño de servicios expresos en corredores con restricciones de capacidad, Leiva et al. 2010 [27], Larraín et al. 2010 [28], Larraín y Muñoz 2019 [29].

También es posible citar el trabajo de Arana 2004 [30], quien estableció la formulación matemática para una herramienta enfocada en el diseño de la red rutas de TransMilenio. La herramienta propuesta incluía un módulo para la determinación de los puntos de parada óptimos de las rutas en varios tramos del sistema de aquella época.

Entre otros autores que han realizado contribuciones al tema se encuentran Scorcia 2010 [4], con un trabajo de diseño y evaluación de sistemas BRT y servicios expresos aplicable a la ciudad de Chicago; Hart 2016 [31], con una metodología para evaluar el potencial de servicios expresos en corredores donde operan también servicios regulares (metodología que podría ser adaptada para la evaluación de futuros servicios expresos BRT en Bogotá que operen en los mismos corredores de las actuales rutas zonales del SITP); Ghaderi et al. 2017 [32], con un método enfocado en reducir los tiempos de viaje de los usuarios mediante el análisis espacial de las estaciones y sus ubicaciones; Luo et al. 2017 [33], con una heurística para el diseño de servicios expresos en hora punta con flota de tamaño fijo; o más recientemente, García y Jaramillo 2019 [34], quienes buscan maximizar la función de comodidad de los usuarios dentro de los buses por medio de un mejoramiento de los servicios expresos, partiendo de que se mantenga la misma cantidad de flota previamente operativa.

Es remarcable que, en general, la literatura encontrada analiza el problema de selección de puntos de parada desde una perspectiva analítica que implica la resolución de modelos matemáticos teóricos, sin adentrarse demasiado en la observación real en campo de las condiciones en los puntos de parada de un sistema de transporte.

### **1.2.3 Problema de asignación de frecuencias en el transporte público**

Tal como sucede con el problema de la subsección anterior, la asignación de frecuencias en los servicios de transporte público es un área que ha sido extensamente estudiada y que, además, suele ir de la mano con el estudio de la selección de puntos de parada, por lo que en las investigaciones citadas hasta el momento se suelen incorporar modelos de optimización matemática o metodologías heurísticas para asignar frecuencias a los servicios que se diseñan.

Por otra parte, los diferentes paquetes comerciales de software para modelación de transporte (Visum, TransCad, Emme) ofrecen módulos que permiten asignar la demanda de pasajeros a las distintas rutas partiendo de unas frecuencias base, luego conocer los máximos volúmenes asignados por ruta y así inferir las nuevas frecuencias de cada servicio, para realizar nuevamente el proceso de asignación de la demanda hasta obtener una solución estable después de varias iteraciones.

En cuanto a investigaciones con estudio de caso aplicado al sistema de transporte de Bogotá, es posible mencionar nuevamente a Arana 2004 [30], cuya propuesta de herramienta también contemplaba un módulo para la optimización de las frecuencias de los servicios de TransMilenio. Por su parte, Campos 2016 [35] plantea una heurística tipo “Lego” que permitiría obtener una asignación de frecuencias razonable para el sistema BRT de Bogotá. Mientras tanto, Peña et al. 2016 [36] presenta un modelo matemático que se adapta al caso de TransMilenio para optimizar su operación mediante el ajuste de las frecuencias y variaciones en los instantes de partida programados para las diferentes rutas.

Una metodología heurística basada en un algoritmo evolutivo para acometer simultáneamente el diseño de rutas y la asignación de sus frecuencias es desarrollada por Martínez et al. 2017 [37], con caso de aplicación teórica a varios sistemas BRT de Colombia. Otro estudio es el de Soto 2017 [38], quien propone un algoritmo binivel que separa en dos etapas los problemas de asignación de la demanda y asignación de frecuencias a los servicios y aplica su metodología a escenarios basados en el corredor de la Av. Caracas.

En general, nuevamente se puede decir que una buena parte de las investigaciones afrontan el problema de asignación de rutas en un sistema de transporte de manera teórica con un fuerte componente matemático. Sin embargo, resulta interesante la propuesta de Páez 2017 [39] consistente en diseñar una herramienta que de forma automática detecte la acumulación de pasajeros en estaciones de TransMilenio y programe, de manera dinámica, rutas expresas que permitan atender en tiempo real las necesidades de viaje de los usuarios.

### **1.2.4 Documentos técnicos y legales aplicables al caso de Bogotá**

En esta subsección se revisarán los estudios técnicos y el marco legal de los proyectos que se tienen contemplados dentro del horizonte propuesto para el sistema de transporte de Bogotá.

El primer documento es el Conpes 3945 de 2018 [40], en el cual se declaró la importancia estratégica de la construcción de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB), de la cual hacen parte las troncales alimentadoras de la Avenida 68 y la Avenida Ciudad de Cali. Con esta declaración se abrió la puerta para que la Nación aporte recursos de cofinanciación para hacer realidad estos proyectos.

En primer lugar, el Conpes 3945 hace una revisión de antecedentes que describe la política de participación nacional en el desarrollo de sistemas de transporte y la política para sistemas de transporte en la Región Capital, así como una justificación para la declaración de importancia estratégica. A continuación, el documento presenta un completo diagnóstico de la movilidad en Bogotá, incluyendo una descripción de los viajes realizados en la ciudad y detalla cómo ha sido la disminución de los viajes totales realizados en transporte público entre 2011 y 2015. El diagnóstico también incluye información de cargas por tramo para la troncal de TransMilenio en el año 2016 y los correspondientes modelos de transporte que ilustran la evolución del sistema troncal y el metro para los años 2030 y 2050. La Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) es la fuente de estos datos y modelos. Así mismo, se hace una revisión del cumplimiento de los requisitos para que la ciudad pueda recibir la cofinanciación y se presenta una descripción de las dos troncales alimentadoras: parámetros de diseño y operación, estaciones, urbanismo complementario, costos y beneficios del proyecto. Finalmente, el Conpes 3945 define el flujo de los recursos económicos que destinará la nación para cofinanciar las infraestructuras correspondientes.

Otros documentos Conpes de gran importancia como insumos para la construcción de los escenarios de modelación son el Conpes 3899 de 2017 [41], el cual ratifica el apoyo del Gobierno nacional a la política de movilidad de la Región Capital Bogotá-Cundinamarca y declara la importancia estratégica del proyecto Sistema Integrado de

Transporte Masivo – Soacha fases II y III; el Conpes 3900 de 2017 [42], donde se declara la importancia estratégica de la construcción de la PLMB y se presentan proyecciones de demanda para el corredor elevado; y el Conpes 3902 de 2017 [43], mediante el cual se realiza la declaratoria de importancia estratégica del proyecto Regiotram de Occidente y se presentan parámetros de diseño, operacionales, demanda y económicos para este proyecto de tren de cercanías.

En lo relativo a estudios técnicos, entre los documentos fundamentales de consulta se encuentran los informes de parámetros técnicos operacionales realizados en 2017 por TransMilenio S.A. (TMSA) para las troncales de la Av. Ciudad de Cali [44], Av. Boyacá [45] y Av. 68 [46], y en 2016, para la interacción de la PLMB con el sistema TransMilenio [47]. Además, como insumo base para el modelo de transporte se pueden citar los informes ejecutivos de 2017 de la SDM [48] [49] [50] sobre modelación de la demanda que muestran los resultados obtenidos para diversos escenarios futuros (2022, 2030 y 2050) en los cuales se considera la aparición de diversos sistemas férreos (con énfasis en la PLMB y el Regiotram) y nuevas troncales de TransMilenio. También, debe tenerse muy en cuenta el reciente Anexo Técnico para el Plan Marco del SITP [51], generado por TransMilenio S.A. a finales de 2019.

Finalmente, no es posible dejar de mencionar a la Encuesta de Movilidad 2019 como piedra fundamental de cualquier proceso de generación y atracción de viajes que se realice en el presente trabajo. La SDM publicó en enero de 2020 el informe [52] con los resultados de dicha encuesta.

### **1.3 Estudio de casos internacionales**

La segunda perspectiva del estado del arte consiste en el estudio de dos casos internacionales de ciudades que posean similitudes con Bogotá. El objetivo es analizar las redes de rutas implementadas en estos lugares para contribuir a la generación de principios rectores aplicables al diseño de rutas en el transporte público.

Dentro de las características deseables para estas ciudades se considera que su tamaño, tanto en área como población, sea del mismo orden que el de Bogotá; que exista un sistema de buses BRT complementado por buses zonales y alimentadores; y

que existan una o varias líneas de metro. Además, es preferible que estas ciudades también tengan similitudes sociales, culturales y económicas con la capital colombiana.

Tomando en cuenta lo anterior, se ha definido que las dos ciudades del estudio sean Santiago de Chile y Lima, Perú. Se presenta un cuadro comparativo (Tabla 1-1) con las características básicas de cada ciudad y sus sistemas de transporte. En el Anexo B, hacia el final de este libro, se revisarán en detalle los modos de transporte que componen cada sistema; sus líneas, servicios y rutas; así como sus puntos de parada e intercambio modal; políticas de integración tarifaria, y demás elementos relevantes para el diseño de rutas en el transporte público.

**Tabla 1-1:** Comparativa entre Bogotá, Santiago y Lima

<b>Parámetro</b>	<b>Bogotá</b>	<b>Santiago</b>	<b>Lima</b>
<b>Población núcleo urbano (Hab.)</b>	7.387.400 [53]	6.257.516 [54]	8.574.974 [55]
<b>Población área metropolitana (Hab.)</b>	8.879.512 [53]	7.112.808 [54]	9.485.405 [55]
<b>Área núcleo urbano (Km<sup>2</sup>.)</b>	379,7 [56]	837,9 [57]	2.672,3 [55]
<b>Área metropolitana (Km<sup>2</sup>.)</b>	1.636,4 [56]	15.403,2 [58]	2.819,3 [55]
<b>Viajes diarios metro (Hábil típ. aprox.)</b>	-	2.471.000 [59]	692.000 [60]
<b>Viajes diarios buses (Hábil típ. aprox.)</b>	4.040.149 [1]	3.000.000 [59]	700.000 [61]
<b>Viajes diarios trenes (Hábil típ. aprox.)</b>	-	33.000 [59]	-
<b>Líneas de Metro</b>	0	7 [62]	1 [63]
<b>Km. construidos Metro (Km.)</b>	0	140 [62]	35 [63]
<b>Troncales BRT</b>	9 [1]	5 [64]	1 [65]
<b>Km. construidos BRT (Km.)</b>	114 [1]	81 [64]	27 [65]
<b>Líneas de Tren</b>	0	1 [59]	0
<b>Km. construidos Tren (Km.)</b>	0	20 [59]	0
<b>Km. cobertura Buses</b>	2.058 [1]	2.834 [64]	-
<b>Integración tarifaria</b>	Parcial [66]	SÍ [67]	Parcial [68]
<b>Número de transbordos</b>	2 [66]	2 [67]	2 [68]
<b>Ventana de tiempo</b>	110 [66]	120 [67]	122 [68]

En esta sección se explicarán las lecciones aprendidas más importantes, extraídas de los casos de estudio, que puedan ser aplicados al diseño de rutas en el componente troncal del SITP. En primer lugar, uno de los hechos más relevantes es la presencia de estaciones centrales de intercambio en las dos ciudades estudiadas, aunque su implementación se da de manera más amplia en Santiago. En esta ciudad existen

diferentes estaciones centrales cuya función es interconectar diferentes tramos férreos y de buses. Destacable es la estación La Cisterna, la cual posee cinco niveles en los cuales existen zonas comerciales habilitadas para los usuarios, además de plataformas para la integración modal del metro, buses urbanos, interurbanos, alimentadores, taxis y parqueaderos.

Por su parte, Lima posee la Estación Central, la cual divide en dos sectores la troncal BRT existente. Esta estación posee tres niveles y facilita el transbordo entre diferentes servicios de buses, incluyendo una ruta alimentadora. La importancia de estas estaciones centrales, aparte de la evidente integración modal que ofrecen, radica en que sirven como puntos de conexión entre diferentes servicios, lo cual facilita el diseño de rutas radiales, con las cuales es posible optimizar el uso de la flota de buses.

En segundo lugar, otra enseñanza extraída de los casos analizados es que en estas ciudades predomina el diseño de rutas con diferentes criterios. Esto significa que además de existir los clásicos servicios paradores y expresos, también se han implementado rutas superexpresas y parciales – servicios inyectados – entre estaciones intermedias.

Por último, es de destacar que en Lima predomina el diseño de rutas radiales, con las cuales se busca optimizar el requerimiento de flota, haciendo uso del espacio de interconexión facilitado por la Estación Central. Entre tanto, en Santiago se diseñan rutas tanto diametrales como radiales, siendo el sistema de rutas de esta ciudad algo complejo, pero diseñado en pro de la optimización operacional.

## **1.4 Entrevistas a expertos nacionales e internacionales**

La tercera perspectiva de este estado del arte consiste en recolectar aportes de varios expertos para inspirar principios rectores y lineamientos para el diseño de rutas en TransMilenio. Es necesario anotar que el aporte de los entrevistados es amplio y diverso, pero es el investigador, con base en su experiencia, quien se encarga de acotar y adaptar los aportes más relevantes. En el Anexo C, al final de este libro, se presentan las cinco preguntas base formuladas en las entrevistas, junto a los aportes más destacados y las respuestas más frecuentes dadas por todos los expertos en su conjunto.

**Tabla 1-2:** Expertos entrevistados en orden cronológico

<b>Experto</b>	<b>Academia e investigación</b>	<b>Banca multilateral</b>	<b>Concesionarios Operadores</b>	<b>Sector Público</b>	<b>Consultoría y asesorías</b>
Otto Sarmiento (Ing. civil)			X		
Fabio Gordillo (Ing. industrial)				X	X
Javier Hernández (Abogado)				X	
Darío Hidalgo (Ing. civil)	X			X	X
Ana Luisa Flechas (Ing. transporte)	X			X	X
Angelica Castro (Ing. civil)				X	X
Manuel Salazar (Ing. civil)			X	X	X
Harvey Scorgia (Ing. civil)		X		X	X
Luis Willumsen (Ing. civil)	X				X
Leonardo Cañón (Ing. civil)		X		X	
Pedro Szasz (Ing. mecánico)				X	X
Germán Lleras (Ing. civil)				X	X

La Tabla 1-2 lista a los expertos entrevistados indicando sus sectores de experticia más relevantes. Los entrevistados han sido escogidos por su gran experiencia específica en sistemas BRT. Además, se ha verificado que el conjunto de expertos tuviera opiniones

variadas, y a veces encontradas, para disminuir la posibilidad de generar sesgos en esta investigación. Ahora, de la Tabla 1-3 a la

Tabla 1-7 se presenta un resumen cuantificado con las respuestas obtenidas. Allí, el peso ponderado de cada ítem es proporcional a la frecuencia con la que fue mencionado.

**Tabla 1-3:** Resumen de las respuestas a la pregunta 1

<b>Desde el punto de vista de la calidad del servicio al usuario ¿Cuáles considera usted que son las problemáticas más importantes a las que se enfrenta hoy el componente troncal del SITP de Bogotá?</b>	<b>Peso ponderado</b>
Falta de capacidad y altos niveles de ocupación	25,5%
Saturación de estaciones y altos tiempos de acceso	21,8%
Diseño sin el usuario como eje central del sistema	14,5%
Evasión	7,3%
Baja confiabilidad de las frecuencias	7,3%
Mal estado de la infraestructura	7,3%
Diseño operacional complejo, sobreexplotado e inestable	5,5%
Desarticulación y falta de integración	3,6%
Deficiencias en las conexiones entre troncales	3,6%
Ausencia de seguimiento sistemático de los indicadores de las rutas	3,6%

**Tabla 1-4:** Resumen de las respuestas a la pregunta 2

<b>Considerando solamente la red e infraestructura troncal actual ¿Cuáles son las acciones de corto plazo más significativas que se podrían tomar para aliviar las problemáticas enunciadas en el punto anterior?</b>	<b>Peso ponderado</b>
Aumento de la capacidad e infraestructura, y mejora de los niveles de servicio	20,3%
Rediseño operacional	12,5%
Garantizar la asequibilidad del sistema	9,4%
Gestión de la demanda, principalmente en horas punta	9,4%
Ampliación de estaciones, mejora en los accesos y optimización del flujo de usuarios	7,8%
Mejoras en la infraestructura existente	7,8%
Aumento de la cultura ciudadana	7,8%
Mejora en las frecuencias y en el control de la operación	6,3%
Recargas del medio de pago fuera de las estaciones	6,3%
Centralizar el sistema en el usuario	6,3%
Atención rápida de novedades en campo	3,1%
Aumento de los estacionamientos para bicicletas	3,1%

**Tabla 1-5:** Resumen de las respuestas a la pregunta 3

<b>Si de usted dependiera ¿Cuál sería el corredor principal por el cual se debería priorizar la construcción de una nueva troncal BRT o línea férrea en Bogotá? Por favor mencionar solo uno suponiendo que la troncal de la Cr. 68 ya ha sido construida.</b>	<b>Peso ponderado</b>
Planeación integral y a largo plazo	25,0%
Av. Boyacá	12,5%
Cr. 7	12,5%
Ampliación del Metro	8,3%
Av. Cali	8,3%
Av. Villavicencio	8,3%
Cl. 170	4,2%
Metro por la NQS	4,2%
Corredor férreo del sur a Soacha	4,2%
Extensión de la troncal Av. Caracas hasta Yomasa	4,2%
Extensión de la troncal Autopista Norte más allá del Terminal del Norte.	4,2%
Extensión de la troncal Cl. 80 hasta el Puente de Guadua.	4,2%

**Tabla 1-6:** Resumen de las respuestas a la pregunta 4

<b>¿Cuáles son para usted los principios rectores que deberían regir el diseño de rutas en el componente troncal del SITP? (Entendiendo que el proceso de diseño aplica a trazados geográficos, selección de estaciones de parada, intervalos de paso, tipologías de las unidades transportadoras)</b>	<b>Peso ponderado</b>
Garantizar la calidad del servicio al usuario	15,2%
Disminuir la función de tiempos generalizados del usuario	8,9%
Garantizar la asequibilidad del sistema de transporte	7,6%
Cuidar el medio ambiente	7,6%
Establecer una comunicación estratégica con los usuarios	7,6%
Planificar con base en datos de campo y mediciones continuas	5,1%
Disminuir los siniestros viales	5,1%
Aumentar la cobertura y la accesibilidad	5,1%
Diseñar rutas con diversos criterios	5,1%
Simplicidad en el diseño de la red de rutas	5,1%
Diseñar rutas expresas con mayor demanda que la ruta paradora	2,5%
Equilibrar la oferta de buses en las diferentes direcciones	2,5%
Establecer límites máximos y mínimos para las frecuencias	2,5%
Implementar rutas diametrales	2,5%
Tener en cuenta la inestabilidad de las soluciones de los modelos	2,5%
Disponer de flota de mayor capacidad y asignarla adecuadamente	2,5%

Diseñar rutas sin pendiente para sistemas BRT	2,5%
Implementar corredores troncales en zonas de alta densidad poblacional	2,5%
Integrar el sistema con otros modos de transporte	2,5%
Propender por la equidad entre los concesionarios operadores	2,5%
Los principios deben ser explícitos, cuantificables y exactos	2,5%

Tabla 1-7: Resumen de las respuestas a la pregunta 5

¿Qué cambios o acciones concretas recomendaría usted sobre la actual red de rutas del componente troncal del SITP en pro de la mejora del servicio al usuario?	Peso ponderado
Rediseño operacional	30,0%
Planificación con base en la observación y la experiencia	20,0%
Mejora en la interacción con los usuarios y en los sistemas de información	14,0%
Mejora en el control de la operación	8,0%
Equilibrio y holgura entre la oferta y la demanda	8,0%
Ampliación y rediseño de estaciones	4,0%
Integración con otros modos de transporte	4,0%
Promoción y mejora de la cultura ciudadana	4,0%
Mejora en las interconexiones entre corredores troncales	4,0%
Subsidios cruzados entre componentes del sistema de transporte	4,0%

Finalmente, en la Figura 1-1 se presenta una nube de palabras que resume gráficamente los conceptos clave obtenidos durante las entrevistas.

Figura 1-1: Nube de palabras con los conceptos clave obtenidos durante las entrevistas



Fuente: Elaboración propia utilizando “nubedepalabras.es” [69].

## 1.5 Revisión de paquetes de software de modelación de transporte

Tal como se plantea en el Capítulo 3, la presente investigación pondrá a prueba diferentes escenarios de rutas troncales BRT diseñadas con diferentes lineamientos. Para ello, es importante contar con una herramienta de macromodelación de transporte que permita simular y analizar el comportamiento de los viajeros. A continuación, se presenta un muy breve resumen de los principales paquetes de software disponibles para tal fin, indicándose cuál es la herramienta escogida para el desarrollo de la presente investigación y las razones para su elección:

- **TransCad:** Herramienta desarrollada por la empresa Caliper de Estados Unidos. Ofrece funcionalidades para el pronóstico de la demanda utilizando sistemas de información geográfica -SIG-, cálculo de la generación y atracción de viajes, análisis de selección modal, y asignaciones de viajes multimodales y multiclase. Además, ofrece todas las funcionalidades necesarias para trabajar con redes de transporte público y privado [70].
- **Emme:** Herramienta desarrollada por la empresa INRO de Canadá. Ofrece, al igual que la anterior, todas las funcionalidades para implementar un modelo de cuatro pasos. Se caracteriza por su flexibilidad y la gran cantidad de herramientas extendidas que posee. Además, permite la automatización de los modelos mediante la implementación de scripts y el uso de interfaces de aplicación -APIs- [71]. No sobra decir que Emme es el software utilizado por la SDM para su modelo de transporte.
- **Visum:** Herramienta desarrollada por la empresa PTV de Alemania. Del mismo modo que las anteriores, ofrece todas las funcionalidades para la implementación de un modelo de cuatro pasos. Además, ofrece métodos para realizar simulaciones multicapa y varios módulos adicionales, entre ellos uno para la generación de itinerarios de buses -blocking- en rutas de servicio público [72].

La herramienta escogida para este proceso investigativo es Visum. Las razones son las siguientes:

- En primer lugar, el investigador tiene amplia experiencia en el uso de esta herramienta, habiendo trabajado anteriormente en el desarrollo de proyectos de macromodelación usando Visum. Este factor será muy útil para garantizar el adecuado avance en el desarrollo de la investigación.
- En segundo lugar, si bien todas las herramientas descritas son adecuadas para desarrollar el ejercicio que se propone, Visum tiene algunas ventajas que podrían ser importantes en investigaciones futuras. Una de ellas es la posibilidad de acoplarse con el software Vissim -especializado en micromodelaciones- para realizar análisis de tráfico sobre la red troncal BRT de Bogotá. Esto no está dentro del alcance de la presente investigación, pero sin duda es un paso futuro que podría dar luces acerca del comportamiento del tránsito en la red troncal, bajo diferentes escenarios de diseño de rutas. Así mismo, como ya se dijo, Visum posee un módulo para la creación de los itinerarios de los buses en rutas de transporte público y la estimación del tamaño de la flota requerida, lo cual puede ser muy útil en futuros trabajos, aunque tampoco es parte de esta investigación.
- Finalmente, se ha logrado establecer un permiso de uso de la herramienta con la empresa consultora GSD Plus de Bogotá. Esto implica un ahorro económico importante, relativo al costo de licenciamiento del paquete de macromodelación.

Siendo así, se concluye diciendo que cualquiera de las herramientas mencionadas ofrece funcionalidades más que suficientes para la consecución de los objetivos de este proyecto, pero se ha escogido PTV-Visum por las razones expuestas.

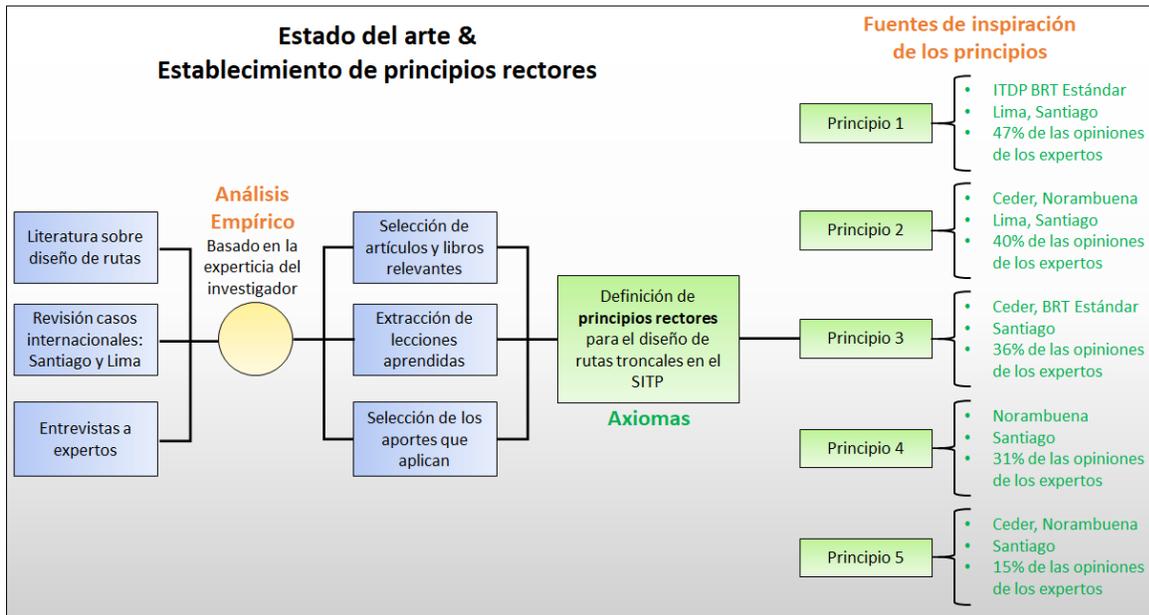
## **2.Principios rectores para el diseño de la red rutas troncales en el SITP de Bogotá**

En este segundo capítulo se presentarán los principios rectores y los lineamientos aplicables al Problema de Diseño de la Red de Rutas en el componente troncal del SITP. En primer lugar, se introducirán como axiomas los principios rectores para el diseño de rutas. A continuación, se presentarán los conjuntos de lineamientos derivados de estos principios. La idea de fondo es que estos conjuntos de lineamientos representen, en lo posible, filosofías opuestas o no concordantes relativas al diseño de la red de rutas en un sistema BRT. En el capítulo 4 se evaluará cada conjunto de lineamientos para tratar de determinar cuáles se ajustan mejor a las necesidades de la ciudad.

### **2.1 Principios rectores como axiomas**

En esta sección se enunciarán como axiomas, es decir, como premisas de partida que no precisan de demostración y cuyo valor de verdad podría entenderse intuitivamente, los principios rectores para el Problema de Diseño de la Red de Rutas en el componente troncal del SITP.

La Figura 2-1 muestra el esquema conceptual que se ha seguido para el planteamiento de los principios rectores. En primer lugar, y con base en el trabajo desarrollado durante la elaboración del estado del arte, se ha hecho una selección de la literatura más relevante sobre el tema, se han extraído las lecciones aprendidas de los casos de Santiago y Lima, y se han seleccionado los aportes de los expertos que mejor calzan con los objetivos de esta investigación. Para lo anterior, ha sido fundamental el criterio del investigador, quien de manera empírica, y basado en su experiencia en el sector del transporte, ha escogido los ítems que mejor reflejan el espíritu de los objetivos a conseguir.

**Figura 2-1:** Esquema conceptual para la obtención de los principios rectores

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, el investigador ha procedido a definir los principios rectores que según su criterio deberían aplicarse. Se reitera que estos principios rectores constituyen los axiomas sobre los cuales se sustenta este trabajo, y por lo tanto, no requieren de una demostración lógica exhaustiva. Más bien, deben entenderse como hechos que intuitivamente pueden darse como ciertos dentro del mundo de la planeación de transporte, y que tienen el soporte teórico y empírico desarrollado en el estado del arte. La figura también da detalles de cuáles fueron las fuentes de inspiración de cada uno de los principios rectores desde la literatura, los casos de estudio y las entrevistas.

Particularmente, se tendrá en cuenta uno de los aportes recolectados durante las entrevistas, **“Los principios deben ser explícitos, cuantificables y exactos”**, y por lo tanto, siempre que sea posible, se formularán los principios de una manera cuantitativa que no se preste para ambigüedades. El soporte para esta cuantificación son los textos bibliográficos o autores que aparecen en la Figura 2-1, en fuentes de inspiración.

A continuación, se presentan estos principios rectores.

### 2.1.1 Primer principio

#### Garantizar la calidad y el nivel del servicio al usuario

(2.1)

Este principio, a su vez, implica lo siguiente:

- Minimizar la función de tiempos generalizados de los usuarios: tiempos de acceso, tiempos de espera, tiempos de viaje a bordo y tiempos de transbordo.
- Implementar un mecanismo claro, transparente y visible que permita demostrar que cada rediseño de servicios impacta positivamente en los tiempos generalizados del usuario
- Establecer un límite mínimo para las frecuencias de los servicios. En este caso, se asumirá lo establecido por el “Institute for Transportation and Development Policy” -ITDP- en su Estándar BRT 2016 [73] para obtener la máxima calificación en este rubro, 8 buses por hora como mínimo, durante las horas punta.
- Definir un límite máximo de los tiempos de espera y transbordo para cualquier usuario del sistema. Por criterio del investigador, se define este límite como el periodo de tiempo máximo que podría transcurrir para que el usuario pueda abordar, en el peor de los casos, el segundo bus que pase de la ruta deseada. En números, esto se traduce como 2 veces el intervalo de paso máximo, lo que equivale a 15 minutos como tiempo máximo de espera para cualquier usuario.
- Fijar una ocupación máxima deseable en buses y estaciones. Se tomarán como referencia los indicadores del Estándar BRT 2016. Allí se establece el límite de sobrecupo para buses como 5 pasajeros por metro cuadrado. Para estaciones, 3 pasajeros por metro cuadrado. Ambos valores deben interpretarse como valores de ocupación promedio durante las horas punta.

Indiscutiblemente, existen otros factores que pueden ser considerados como parte de un servicio de calidad en el transporte público. Sin embargo, los aquí mencionados son los que se tendrán en cuenta dentro del alcance del proyecto de investigación, con el

objetivo de generar lineamientos para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP.

### **2.1.2 Segundo principio**

#### **Planificar con base en la observación de la realidad y la experiencia (2.2)**

Este principio, a su vez, implica lo siguiente:

- Observar la realidad y medir cuantitativamente los indicadores y variables que sean relevantes para la planificación de la operación. La definición de estos indicadores y variables se abordará en la sección 3.1.
- Hacer uso tanto de la experiencia como de la modelación para afinar cualquier proceso de planificación de los servicios.
- Diseñar y planificar mediante un proceso iterativo que debe ser revisado periódicamente.
- Identificar los deseos de viaje de los usuarios para que se vean plasmados en el diseño de la red de rutas.
- Utilizar herramientas tecnológicas que permitan recolectar información de la realidad para mejorar el diseño de la red de rutas.
- Identificar, mediante la observación en campo, problemas en rutas y estaciones para que sea posible generar alternativas de solución desde la planificación del sistema y sus servicios.

### **2.1.3 Tercer principio**

#### **Aumentar la cobertura y la accesibilidad del sistema de transporte (2.3)**

Este principio, a su vez, implica lo siguiente:

- La red de rutas del componente troncal del SITP debe atender absolutamente todos los nodos -estaciones- del sistema.

- Cualquier usuario, en cualquier estación, debe tener a su disposición servicios que lo conecten con cualquier otro punto del sistema troncal, requiriendo máximo 2 transbordos para llegar a su destino.
- Para cualquier usuario, en cualquier estación, debe ser posible acceder en un tiempo razonable al servicio de transporte público. Tal como se definió en el principio 2.1, el límite máximo para el tiempo de espera en estaciones se fija en 15 minutos. Sin embargo, en la presente investigación no se abordará lo relativo a los tiempos de acceso a las estaciones, por ser este un problema que puede manejarse mejor mediante una ampliación de la infraestructura: número de torniquetes, tamaño de las estaciones, ancho de los puentes peatonales y/o alternativas rápidas para la recarga de la tarjeta. En la subsección 3.1.2 se discutirá por qué no se incluirán los tiempos de acceso a las estaciones dentro de la función objetivo considerada para el modelo de transporte de la red troncal.

### **2.1.4 Cuarto principio**

**Facilitar la integración con otros modos de transporte** (2.4)

Este principio, a su vez, implica lo siguiente:

- El diseño de la red de rutas debe facilitar a los usuarios el intercambio modal con otros componentes del sistema, tales como las rutas alimentadoras y zonales, y con otros modos englobados dentro de la micromovilidad y los viajes de última milla.
- El diseño de la red de rutas debe dar un tratamiento adecuado al 100% de las estaciones en las cuales los usuarios tengan a su disposición otros modos de transporte, generando las frecuencias y paradas requeridas para que se puedan realizar intercambios modales de forma eficiente.

### **2.1.5 Quinto principio**

**Planificar integralmente contemplando el largo plazo** (2.5)

Este principio, a su vez, implica lo siguiente:

- Se requiere una planeación integral y de largo plazo para poder tomar decisiones estratégicas sobre la priorización de corredores de transporte masivo en Bogotá. Para ello, se necesita la implementación de un plan maestro que permita establecer un cronograma de priorización futura de diferentes corredores férreos y troncales, basándose en modelos y datos cuantitativos que pongan en cifras precisas el impacto de las diferentes alternativas.
- El diseño de la red de rutas debe ser pensado para el largo plazo y contemplar, de antemano, la entrada de nuevos corredores de transporte en el futuro. Esto facilitará que los cambios en los servicios con la inauguración de nuevas obras sean menos traumáticos.
- La nomenclatura del 100% de los servicios debe ser consistente y debe permitir añadir un número significativo de nuevas rutas, sin tener que hacer cambios en la estructura general de los nombres de los servicios. Fijando una cota superior, la nomenclatura utilizada debería permitir el nombramiento estandarizado de 1000 servicios, al menos.

### **2.1.6 Otros principios**

Durante la elaboración del estado del arte fueron recolectados otros principios que, aunque no se refieren específicamente al Problema de Diseño de la Red de Rutas y cuya formulación cuantitativa no está dentro del alcance de la presente investigación, sí son muy importantes a la hora de realizar tareas de planificación en el componente troncal del SITP. Estos principios serán enunciados de manera concisa aquí:

**Aumentar la capacidad e infraestructura del sistema troncal** (2.6)

**Establecer una comunicación estratégica con los usuarios y reforzar los sistemas de información** (2.7)

**Disminuir los siniestros viales en el sistema de transporte** (2.8)

**Cuidar el medio ambiente** (2.9)

### 2.1.7 Resumen tabular de los principios

Los lineamientos que se desarrollarán en las secciones siguientes tendrán como base los 9 principios recién enunciados, los cuales se resumen en la Tabla 2-1.

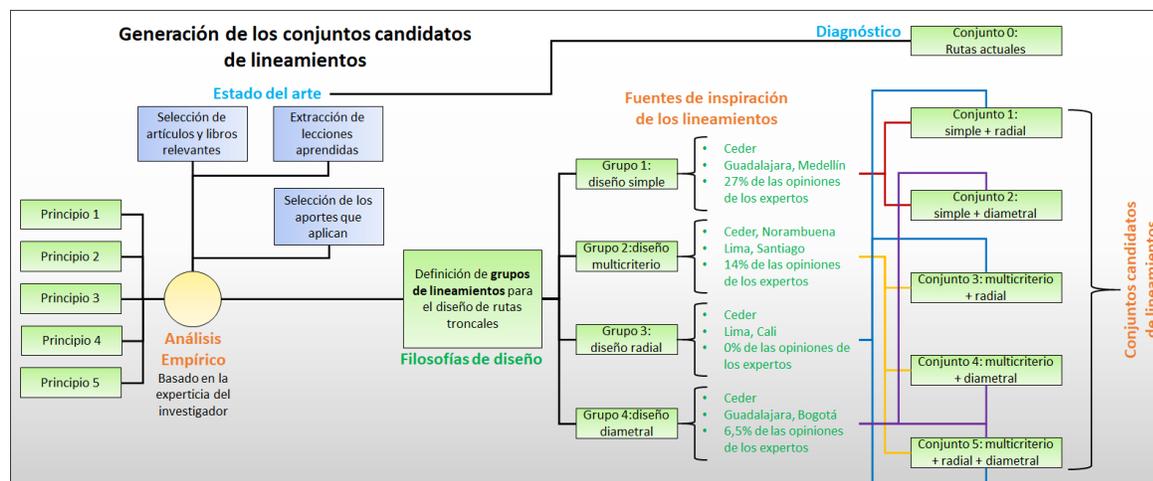
**Tabla 2-1:** Principios rectores para el Problema de Diseño de la Red de Rutas en el componente troncal del SITP

No.	Principio	Cuantificación
2.1	Garantizar la calidad y el nivel del servicio al usuario	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minimizar la función de tiempos del usuario               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencia mínima por servicio <math>\geq 8</math> buses/hora [73]</li> </ul> </li> <li>• Tiempo de espera máximo <math>\leq 15</math> min [73]               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocupación máxima en buses <math>\leq 5</math> pasajeros/m<sup>2</sup> [73]</li> </ul> </li> <li>• Ocupación máxima en estaciones <math>\leq 3</math> usuarios/m<sup>2</sup> [73]</li> </ul>
2.2	Planificar con base en la observación de la realidad y la experiencia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ver definición de indicadores y variables en la sección 3.1 [5] [26]</li> </ul>
2.3	Aumentar la cobertura y la accesibilidad del sistema de transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cubrir el 100% de las estaciones del sistema [73]</li> <li>• Conectar cualesquiera dos estaciones, requiriendo máximo dos transbordos [5]</li> <li>• Tiempo de espera máximo <math>\leq 15</math> min [73]</li> <li>• No se modelará el tiempo de acceso a estaciones</li> </ul>
2.4	Facilitar la integración con otros modos de transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frecuencias y paradas adecuadas en el 100% de las estaciones en las cuales se permita la integración modal [26]</li> </ul>
2.5	Planificar integralmente contemplando el largo plazo	No aplica
2.6	Aumentar la capacidad e infraestructura del sistema troncal	Principio de planificación general, cuya cuantificación está fuera del alcance de la investigación
2.7	Establecer una comunicación estratégica con los usuarios y reforzar los sistemas de información	Principio de planificación general, cuya cuantificación está fuera del alcance de la investigación
2.8	Disminuir los siniestros viales en el sistema de transporte	Principio de planificación general, cuya cuantificación está fuera del alcance de la investigación
2.9	Cuidar el medio ambiente	Principio de planificación general, cuya cuantificación está fuera del alcance de la investigación

## 2.2 Lineamientos candidatos para el diseño de rutas troncales

La Figura 2-2 ilustra el proceso conceptual para establecer conjuntos candidatos de lineamientos para el diseño de rutas troncales. Con “candidatos” quiere expresarse que son lineamientos que serán puestos a prueba para determinar cuáles de ellos son apropiados para su implementación en el BRT de Bogotá. En este caso, se parte de los principios rectores ya definidos y se retoman los hallazgos del estado del arte. De nuevo, el investigador hace un análisis empírico con base en su experiencia. De este proceso salen cuatro grupos de lineamientos, siendo cada grupo una filosofía distinta de diseño. Como se verá, estas filosofías se caracterizan por tener visiones no concordantes acerca del diseño de servicios troncales. La figura también lista las fuentes de inspiración para cada grupo de lineamientos. Por otra parte, al combinar diferentes filosofías de diseño, nacen los conjuntos candidatos de lineamientos. De ellos se hablará más adelante.

**Figura 2-2:** Esquema conceptual para la obtención de los lineamientos candidatos



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los grupos de lineamientos establecidos, no sin antes reiterar que estos cuatro grupos son los definidos por el investigador para enfrentar el problema planteado. Sin embargo, realmente podrían generarse muchos otros grupos diferentes de lineamientos, a discreción de los objetivos de quien ejecute la metodología.

## 2.2.1 Primer grupo de lineamientos: filosofía de diseño simple

### Diseño simple

(2.10)

Este grupo de lineamientos hace referencia a que el diseño de la red de rutas debe ser lo más simple posible, e incluye las siguientes directrices:

- Disminuir el número de rutas en el sistema:
  - Tener la menor cantidad de categorías de rutas. Para el caso de este proyecto, esta directriz implicará limitarse a servicios expresos y paradores, exclusivamente. Por ende, al momento de diseñar con este lineamiento se descartarán los servicios superexpresos, servicios parciales -que atiendan entre estaciones intermedias-, servicios variantes, servicios especiales, entre otros.
  - Limitar el número de rutas operando en cada corredor troncal. Como no se considerarán servicios parciales, esto significa que del portal de cada corredor troncal solo podrá salir un número limitado de servicios. En este caso, se establece como regla que de cada portal, solo podrán partir una ruta paradora y máximo cuatro rutas expresas, por sentido.
  - No debe existir redundancia de rutas expresas. La implicación de esta directriz es que en un corredor troncal no deben existir rutas paralelas, conectando el mismo origen con la misma zona de destino. Esta pauta no aplica para la ruta paradora única de cada portal.
- Mantener más o menos el mismo conjunto de rutas operando en todo momento.
- Generar una nomenclatura para las rutas clara y fácil de entender a los ojos de los usuarios.
- Diseñar rutas simétricas que tengan los mismos puntos de parada en cualquiera de sus dos sentidos.

En relación con los principios rectores, este grupo de lineamientos busca garantizar la calidad y el nivel del servicio -*Principio 2.1*-, al facilitarle al usuario la elección de rutas durante la planeación de su viaje, partiendo de la premisa de que un diseño más simple les permite a los usuarios tomar decisiones de viaje con mayor entendimiento del funcionamiento del sistema -*Principio 2.7*-.

Por otra parte, un segundo objetivo de la simplicidad en el diseño de rutas es que sea más fácil controlar la operación, aumentando así la confiabilidad de los intervalos de paso de los servicios -*Principio 2.1*-. Según la experiencia de uno de los expertos entrevistados -*Principio 2.2*-, la complejidad de las rutas actuales podría estar dificultando el control de la operación.

Adicionalmente, una cantidad elevada de distintas rutas va a implicar muchos servicios parando en cada puerta -*Principio 2.3*-, lo que puede llevar a la degradación de la experiencia del usuario.

Por último, otra premisa es que un diseño complejo de rutas tiende a volverse inestable y poco resiliente ante cualquier disrupción en el sistema de transporte -*Principio 2.5*-. En cambio, un diseño simplificado podría ofrecer mejor tolerancia ante eventos inesperados que alteren el funcionamiento normal de la operación.

## **2.2.2 Segundo grupo de lineamientos: filosofía de diseño multicriterio**

**Diseño multicriterio** (2.11)

Este grupo de lineamientos se puede considerar la antítesis del grupo de la subsección anterior. Básicamente, se busca que el diseño de rutas adopte múltiples estrategias y criterios que sean necesarios para optimizar la operación, así esto implique generar una red de rutas compleja. Lima y Santiago son ejemplos de ciudades que han aplicado ampliamente lineamientos de esta filosofía, como se analizó en la sección 1.2. Entre sus directrices se tiene:

- Diseñar rutas de diferentes tipos. Al contrario que la subsección anterior, esta directriz promueve que existan distintas categorías de rutas dentro de la red. Para este caso, se pueden incluir servicios paradores, expresos, superexpresos, circulares, parciales, variantes, especiales, asimétricos, nocturnos, etc.
  - Dar especial atención a los servicios parciales entre estaciones intermedias que tengan una demanda de viajes significativa.
  - Tener en cuenta los servicios superexpresos para pares de origen y destino muy cargados.
  - Considerar servicios asimétricos cuyas paradas en cada dirección varíen según los deseos de viaje de los usuarios en una hora determinada.

- No limitar el número de rutas por corredor. Esto significa que en cada portal o estación podrá existir un número indefinido de servicios de cualquier tipo. Sin embargo, en la práctica este número de servicios por portal o estación estará limitado por la cantidad de cajones de parada disponibles y el número máximo de buses por puerta cada hora.
- Toda estación debe tener al menos una ruta expresa y una ruta paradora que le presten servicio.
- Se permite la redundancia de rutas de cualquier tipo. En este caso, podrán existir varias rutas paralelas que conecten un mismo origen con una misma zona de destino, generando un efecto de red.
- Establecer una frecuencia máxima para los servicios. En este trabajo de investigación se definirá la frecuencia máxima como 24 buses por hora para las rutas diseñadas bajo este lineamiento. Si en el proceso de modelación se determina que una ruta requiere una frecuencia mayor, entonces de esta ruta deberán generarse dos o más rutas paralelas que se repartan las estaciones atendidas por la ruta original.
- Diseñar rutas que atiendan zonas específicas. Se trata de rutas que atiendan ciertas estaciones de origen, y luego, se detengan a dejar a los pasajeros en varias estaciones de una misma zona de destino para distribuir la demanda entre varios puntos, tratando de no sobrecargar una única estación.

En relación con los principios rectores, este grupo de lineamientos busca garantizar la calidad y el nivel del servicio *-Principio 2.1-*, mediante la optimización de la operación troncal haciendo uso de todas las estrategias que contribuyan a mejorar la prestación del servicio. Como es de esperarse, su posible talón de Aquiles es que se suelen generar redes de rutas que no son amigables para el entendimiento del usuario *-Principio 2.7-*.

Por otro lado, poner en práctica este grupo de lineamientos exige un nivel de detalle muy fino que precisa de un alto conocimiento de la operación en campo y de un continuo monitoreo del estado del sistema *-Principio 2.2-*.

Adicionalmente, esta filosofía tiene como premisa que un buen diseño de una red de rutas compleja permite disminuir los tiempos de viaje a bordo, minimizando el tiempo que los pasajeros pasan dentro de los buses, y por lo tanto, generando más accesibilidad

para que nuevos usuarios puedan tomar los puestos que se han desocupado *-Principio 2.3-*.

Finalmente, otra premisa es que las diversas categorías de rutas disponibles facilitan el diseño de servicios especiales para atender las estaciones de integración modal más relevantes *-Principio 2.4-*, ofreciendo gran flexibilidad para la configuración de trazados, paradas y frecuencias de potenciales rutas integradoras.

### **2.2.3 Tercer grupo de lineamientos: filosofía de diseño radial**

#### **Diseño radial**

(2.12)

Este grupo de lineamientos hace referencia a la geometría de los trazados de las rutas. Concretamente, se sugiere que las rutas deben partir desde las zonas generadoras de viajes y hacer el recorrido hasta algún punto clave en el centro ampliado de la ciudad. Entre sus directrices se tiene:

- Priorizar el diseño de rutas radiales que conecten la periferia -portales o estaciones intermedias- con las principales zonas atractoras de viajes en el centro ampliado de la ciudad. Una vez completado su recorrido de ida, los buses deben volver a su origen para retomar un nuevo ciclo.
- Dado que este esquema propicia los transbordos en los puntos de convergencia de las diferentes rutas radiales, es necesario ser extremadamente cuidadoso con la selección de las estaciones de intercambio para evitar la sobrecarga de algunas de estas por exceso de transbordos.
- De la mano con el punto anterior, es preferible contar con al menos una estación central por corredor troncal. Esta estación debe ser lo suficientemente amplia como para recibir un flujo significativo de usuarios haciendo transbordos.
- El punto de retorno de las rutas depende tanto de la longitud de los viajes de los usuarios que vienen de la periferia como de la disponibilidad de retornos operacionales en los cuales los buses puedan dar la vuelta y regresar a sus orígenes.

En relación con los principios rectores, este grupo de lineamientos busca garantizar la calidad y el nivel del servicio *-Principio 2.1-*, mediante la optimización en el uso de la flota que se puede lograr al diseñar rutas radiales en sistemas de transporte desbalanceados.

Un sistema desbalanceado debe entenderse como aquel donde la demanda de pasajeros es mayor en algunos de sus ejes radiales que en otros. Efectivamente, este es el caso de Bogotá, ciudad en la que los corredores radiales provenientes del sur tienen más carga de pasajeros que aquellos del norte. Por otro lado, también se parte de la premisa de que las rutas radiales contribuyen a la mejora del servicio al ser más eficiente el control de la operación con rutas más cortas que permitan una mejor gestión de los intervalos entre los buses.

Los sistemas de rutas radiales también tienden a ser más intuitivos para el usuario, por lo que un diseño con estas características permite un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema -*Principio 2.7*-.

Si bien hoy en día, en el componente troncal del SITP de Bogotá predominan las rutas diametrales, en el caso estudiado de Lima fue posible observar que existe cierta prevalencia de las rutas radiales. Mientras tanto, en Santiago existe una combinación de rutas diametrales y de rutas radiales. Lo anterior para poner en contexto el estudio y la observación de experiencias internacionales, en consonancia con el *Principio 2.2*. Dicho sea de paso, en estas dos ciudades efectivamente existen estaciones centrales de gran tamaño que facilitan los transbordos en el centro de la ciudad.

Adicionalmente, al tener como premisa que un diseño de rutas radiales hace un mejor uso de la flota disponible, esta filosofía contribuye a la accesibilidad en el sistema -*Principio 2.3*-, al generar más sillas por hora para que puedan ser utilizadas por los usuarios de aquellas zonas con mayor demanda de viajes.

Por otra parte, un buen diseño de rutas radiales contribuye a promover la integración con otros modos de transporte -*Principio 2.4*-, siempre que se cuente con las estaciones de intercambio adecuadas.

Finalmente, una red de rutas radiales resulta perfecta para que cada corredor tenga sus propios servicios, y que, llegado el momento, cualquier cambio o adición de corredores impacte lo menos posible en el sistema a nivel general. Dicho de otra forma, el diseño radial de rutas es resiliente ante afectaciones o cambios producidos en alguno de los ramales radiales del sistema -*Principio 2.5*-.

## 2.2.4 Cuarto grupo de lineamientos: filosofía de diseño diametral

### Diseño diametral

(2.13)

Este grupo de lineamientos también hace referencia a la geometría de los trazados de las rutas y es la contrapartida de los lineamientos del grupo anterior. En este caso, se sugiere que las rutas deben partir desde una zona generadora de viajes y hacer su recorrido hasta otra zona generadora, en el extremo opuesto de la ciudad. Entre sus directrices se tiene:

- Priorizar el diseño de rutas diametrales que conecten la periferia -portales o estaciones intermedias- con las principales zonas atractoras de viajes en el centro de la ciudad, y que luego, continúen hacia otro sector periférico en el extremo opuesto. Esto es especialmente relevante si en el diseño existiesen rutas radiales que, partiendo desde extremos opuestos, superpongan sus recorridos durante un tramo considerable en la zona de convergencia.
- Diseñar rutas que interconecten diferentes corredores troncales, según los principales deseos de viaje de los usuarios. Para ello, se requiere contar con interconectores que permitan, valga la redundancia, una conexión eficiente entre diversos corredores.
- Al diseñar rutas diametrales se debe buscar minimizar el número de transbordos, por lo que se precisa que existan rutas que conecten directamente los principales pares de origen y destino que se evidencien al analizar los deseos de viaje de los usuarios.

En relación con los principios rectores, este grupo de lineamientos busca garantizar la calidad y el nivel del servicio -*Principio 2.1*-, mediante la conexión directa de los usuarios con sus destinos, minimizando el número de transbordos necesarios dentro del sistema. Se parte de la premisa de que las rutas diametrales llevan a los usuarios a sus destinos de forma más rápida y directa, y que por lo tanto, es posible disminuir el costo asociado a los tiempos generalizados de viaje, además de no sobrecargar con transbordos ciertas estaciones del sistema.

Desde el punto de vista de los usuarios -*Principio 2.7*-, disponer de rutas directas y sin transbordos puede facilitar sus decisiones de viaje, aunque es posible que el número de

rutas aumente, y por ende, que el usuario requiera tener a su disposición una información más completa sobre la red de rutas implementada.

Como caso de éxito en el diseño de un sistema BRT con rutas diametrales, es posible mencionar a la propia ciudad de Bogotá, cuya experiencia en este tipo de sistemas- *Principio 2.2*- es una de las más destacadas a nivel mundial. Además, su configuración geográfica como una ciudad con múltiples polos generadores y atractores de viajes hace que sea conveniente la implementación de un sistema diametral de rutas.

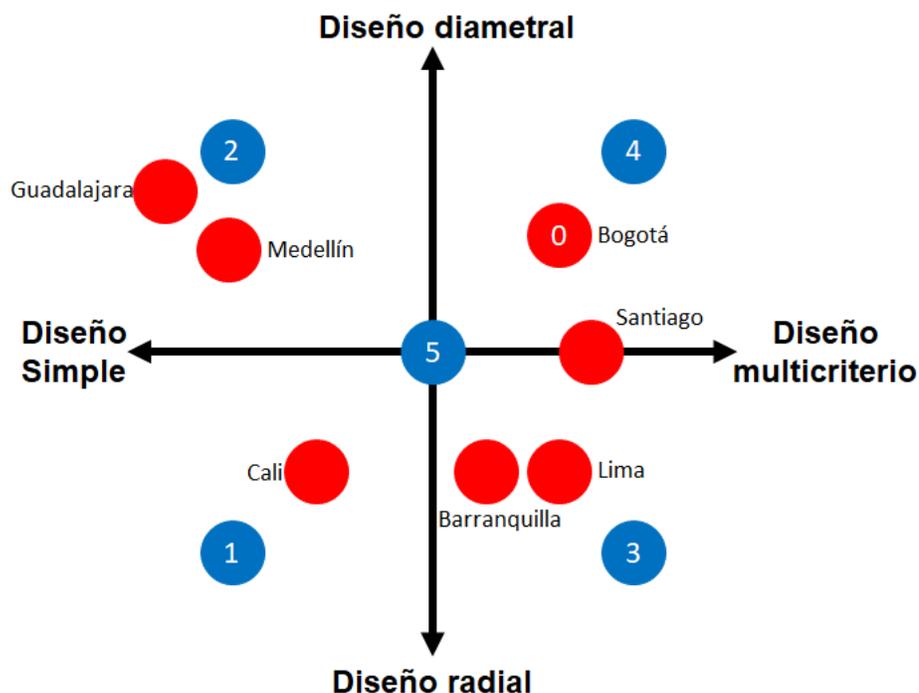
Adicionalmente, al tener como premisa que un diseño de rutas diametrales disminuye los tiempos de viaje, esta filosofía contribuye a la accesibilidad en el sistema -*Principio 2.3*-, al permitir una rotación más rápida y eficiente de las sillas para que puedan ser usadas por nuevos usuarios.

Finalmente, al diseñar rutas diametrales se requiere especial cuidado con la proyección futura de la red de rutas al momento de implementar nuevos corredores troncales - *Principio 2.5*-. De no ser así, se corre el riesgo de terminar generando redes con demasiadas rutas que conecten todos los orígenes con todos los destinos, aumentando la complejidad de la red y la dificultad para su control operativo.

## **2.3 Conjuntos candidatos de lineamientos para el diseño de rutas troncales**

En la sección anterior se han descrito cuatro filosofías de lineamientos para el diseño de rutas. Mientras el primer y segundo grupo de lineamientos se refieren a los criterios que deben usarse para el diseño de rutas, el tercero y cuarto hacen referencia a la geometría de estas. Con base en ello, es posible construir un plano cartesiano, Figura 2-3, en donde cada eje corresponde a una tendencia a seguir.

Tal como se observa en la Figura 2-3, se definirán seis conjuntos candidatos de lineamientos -representados con círculos azules sobre el plano cartesiano, excepto el conjunto 0 en color rojo- que se pondrán a prueba durante la presente investigación, entendiéndose que cada conjunto está formado por dos o más filosofías. Además, los círculos rojos representan ciudades en las cuales se han implementado lineamientos de uno u otro tipo en sus sistemas BRT:

**Figura 2-3:** Plano cartesiano de lineamientos para el diseño de rutas

Fuente: Elaboración propia

- **Conjunto 0:** Este conjunto corresponde a los lineamientos en los que se basa el actual diseño de rutas del componente troncal del SITP. En la red actual tienen prevalencia las rutas diametrales y el diseño basado en múltiples criterios y estrategias, aunque ninguna de las dos filosofías ha sido llevada al extremo, tal como se muestra en el plano cartesiano. Para su modelación se utilizarán las rutas de TransMilenio con corte a febrero de 2020.
- **Conjunto 1:** En este conjunto se combinarán las filosofías de simplicidad y diseño radial de rutas. Por su propia definición, se espera que sea el conjunto de lineamientos que genere la red troncal más sencilla y fácil de entender a los ojos del usuario. La idea es analizar el efecto combinado de estos dos grupos de lineamientos en la eficiencia del sistema de transporte. Un claro ejemplo de la aplicación de estos lineamientos es el Masivo Integrado de Occidente -MIO- en Cali [74]. En este sistema BRT predominan las rutas troncales radiales que conectan la periferia con el centro de la ciudad. Así mismo, el número de rutas troncales expresas es limitado, si bien existe una buena cantidad de rutas

pretroncales que dan cobertura a las zonas de la ciudad en las cuales no existe corredor BRT.

- **Conjunto 2:** Este conjunto corresponde al diseño de rutas diametrales, combinado con un diseño simple. Si bien estas dos filosofías no son tan compatibles a primera vista, se buscará generar rutas diametrales minimizando las posibles combinaciones e interconexiones entre troncales, de modo que se cumplan las restricciones enunciadas en la subsección 2.2.1. Dicho de otra forma, se diseñarán rutas de portal a portal, pero respetando el máximo de servicios que se puede asignar a cada corredor troncal en un diseño simple. Un ejemplo de uso de este conjunto de lineamientos es el que puede verse en el Metroplús de Medellín [75], sistema BRT integrado al Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá -SITVA-. A junio de 2020, este sistema está compuesto por dos líneas, que recorren su corredor troncal de punta a punta, con un diseño de rutas bastante simple. La sencillez en el diseño de rutas ha sido posible gracias a su integración con los otros sistemas de transporte de la ciudad, lo cual favorece el intercambio modal y la movilidad de usuarios con destinos muy diversos. Por otra parte, también es posible citar el caso del sistema BRT Macrobús de Guadalajara [76], compuesto por un corredor troncal que atraviesa la ciudad de sur a norte y que solo tiene una ruta paradora y una ruta expresa. Nuevamente, esta sencillez es posible gracias a la red de trenes que funciona en la ciudad y que conforman un sistema integrado donde los distintos modos se complementan.
- **Conjunto 3:** Tal como se indica en el plano cartesiano de la Figura 2-3, este conjunto de lineamientos combina el diseño de rutas radiales con el diseño multicriterio. Esta combinación puede constituirse como una alternativa que vale la pena analizar y que se ha puesto en práctica en la ciudad de Lima, según lo analizado en la subsección 1.2.2. Igualmente, en el sistema BRT Transmetro de Barranquilla [77] es posible ver aplicados algunos de estos lineamientos, en aspectos tales como el diseño radial de las rutas y la existencia de servicios expresos paralelos compartiendo el mismo corredor troncal.
- **Conjunto 4:** Con este conjunto de lineamientos se buscará llevar más allá el diseño de rutas diametrales y la aplicación de múltiples criterios y estrategias para

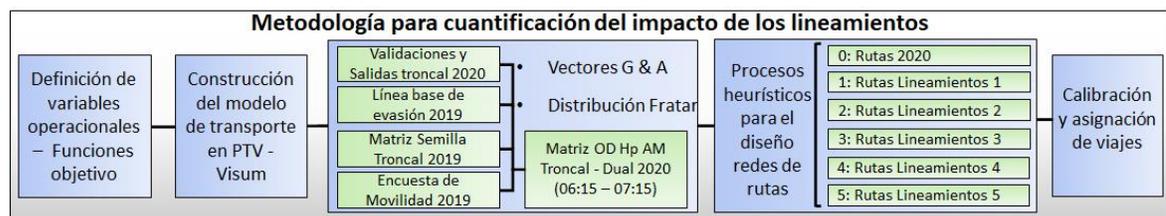
el diseño de rutas en un sistema BRT. Se espera que esta combinación genere la red de rutas más compleja entre los seis conjuntos y puede considerarse similar al caso de Bogotá, pero llevando al extremo la búsqueda de la optimización operacional. Dentro de las estrategias a usar se encuentra la implementación de rutas superexpresas, asimétricas, parciales, paralelas, etc., así como el diseño de rutas para interconexión entre troncales.

- **Conjunto 5:** Finalmente, el quinto conjunto de lineamientos, ubicado en el centro del plano cartesiano, representa aquel que combina indistintamente las cuatro filosofías. Es decir, en este conjunto de lineamientos se permite tanto el diseño de rutas radiales como diametrales, y pueden existir rutas muy simples y/o muy complejas, según se requiera. Al aplicar este conjunto de lineamientos es necesario garantizar un alto nivel de detalle y un gran conocimiento de los deseos de viaje de los usuarios. Esto permitirá diseñar rutas por segmentos de usuarios y por corredor troncal, encontrando las soluciones que mejor se adapten en cada caso. La red de rutas de Santiago de Chile -subsección 1.2.1- se encuentra cerca a este concepto de diseño, allí existen rutas que se pueden enmarcar en los distintos grupos de lineamientos, aunque no podría decirse que el sistema sea precisamente simple.

### 3. Metodología para cuantificar el impacto operacional de los lineamientos

En este capítulo se documentará el proceso de construcción de la metodología para cuantificar el impacto operacional, entendido este como un efecto medible sobre el sistema de transporte de los diversos conjuntos de lineamientos propuestos en la sección 2.3. Inicialmente, se definirán las variables operacionales que sirvan para plantear las funciones objetivo que permitan cuantificar el impacto operacional de los lineamientos. Luego, se describirá el modelo de transporte en PTV-Visum. Este modelo tendrá como función el facilitar la cuantificación del impacto operacional de los lineamientos candidatos, mediante la simulación de distintos escenarios. A continuación, se presentará la matriz de viajes y el proceso para estimarla, lo que incluye los submodelos de generación y atracción, y distribución por Fratar. Esta matriz hace parte integral del modelo de transporte. Enseguida, se establecerán los procesos heurísticos para el diseño de los servicios, procesos que servirán para transformar los conjuntos candidatos de lineamientos en redes de rutas que se puedan modelar. Finalmente, se describirá el proceso iterativo de asignación de viajes que permitirá la cuantificación de las variables operacionales que componen las funciones objetivo.

**Figura 3-1:** Metodología para cuantificar el impacto operacional de los lineamientos.



Fuente: Elaboración propia.

Es necesario hacer reiterar que si bien el modelo de transporte de la red troncal es la piedra angular de la metodología, este modelo no es su único componente. La Figura 3-1

ilustra los componentes de la metodología, en correspondencia con la estructura del presente capítulo. Como puede observarse, la definición de variables operacionales y los procesos heurísticos propuestos también son parte integral de esta metodología.

### 3.1 Definición de variables operacionales y funciones objetivo

La presente sección extraerá aportes de los libros de Ceder 2007 [5] y Norambuena 2002 [26], además de sacar provecho de la experiencia del investigador, quien estuvo vinculado durante varios años a las áreas de planeación y programación de algunos concesionarios operadores del componente troncal y zonal del SITP en Bogotá.

#### 3.1.1 Variables operacionales

Las variables operacionales que deben tenerse en cuenta al momento de diseñar la red de rutas en un sistema de transporte público se pueden dividir en dos grupos: las que definen el costo de operación y las que establecen el costo para el usuario. Dentro del primer grupo es posible mencionar:

- **$C_{km}$  (Costo por kilómetro):** suele incluir los costos energéticos, de mantenimiento, de alistamiento de la flota y costos administrativos por cada kilómetro recorrido por cada unidad de transporte.
- **$C_r$  (Costo por unidad de transporte en ralenti por unidad de tiempo):** corresponde al gasto energético mientras las unidades de transporte están quietas, ya sea porque los usuarios están abordando o por la congestión vial. Habitualmente este costo puede incluirse dentro del costo total por kilómetro.
- **$C_c$  (Costo de los conductores por unidad de transporte):** salario de los conductores requeridos para la operación de cada unidad de transporte, incluyendo conductores disponibles y prestaciones legales.
- **$C_p$  (Costo del área de patios requerida por unidad de transporte):** se trata del costo por concepto de arrendamientos, operación e impuestos sobre los terrenos que sirven como patios para cada unidad de transporte.

- **$N_f$  (Número de unidades de transporte):** número de vehículos necesarios para cubrir la demanda. Suele estar discriminado por la tipología de las unidades de transporte y puede incluir algún porcentaje de disponibilidad de flota para contingencias.
- **$N_{pl}$  (Número de total plazas):** número de plazas totales para pasajeros, contando tanto las sillas como los espacios para pasajeros de pie, en los vehículos necesarios para cubrir la demanda. Se trata de una variable útil para estimar el tamaño de la flota cuando existen buses de diferentes tipologías operando en un sistema de transporte.

En cuanto a las variables relativas al costo para el usuario, las más representativas son:

- **$t_{acc}$  (Tiempo de acceso):** tiempo que los usuarios tardan en acceder a las estaciones o paraderos del sistema de transporte.
- **$t_{esp}$  (Tiempo de espera):** tiempo de espera de los usuarios en las estaciones o paraderos mientras les es posible abordar el primer servicio requerido para su viaje.
- **$t_v$  (Tiempo de viaje):** tiempo de viaje de los usuarios a bordo de las unidades de transporte.
- **$t_{trans}$  (Tiempo de transbordo):** tiempo que les toma a los usuarios realizar un transbordo.
- **$T$  (Tarifa del servicio):** costo monetario que el usuario debe pagar por el servicio de transporte.

### 3.1.2 Funciones objetivo

Una vez se han definido las posibles variables que podrían hacer parte de la función objetivo requerida para la investigación, es momento de analizar cuáles de estas son relevantes para el problema en estudio.

En primer lugar, es de suma importancia recordar que la investigación se enfoca en generar lineamientos para el diseño de rutas del componente troncal del SITP de Bogotá en la hora punta AM. Para nadie es un secreto que en esta franja horaria el sistema TransMilenio ha visto rebasada su capacidad de transporte en los últimos años y que deben realizarse grandes esfuerzos en todos los niveles para solucionar esta problemática. Uno de los esfuerzos sobre los cuales el investigador puede dar fe, con base en su experiencia laboral, es que en el SITP, tanto zonal como troncal, se programa toda la flota disponible durante las horas de mayor afluencia de pasajeros para cubrir la demanda de transporte. Por lo tanto, basándose en el principio 2.1 relativo a la calidad del servicio al usuario, se establece el siguiente lineamiento adicional para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP, aplicable solamente para la operación en horas de mayor demanda:

**“Durante las horas punta, se debe programar toda la flota disponible y no se deben escatimar recursos para cubrir la demanda de pasajeros”**

La búsqueda del equilibrio entre costos de operación y costos del usuario debería realizarse fuera de las horas de mayor demanda. Sin embargo, no está dentro del alcance de la presente investigación establecer lineamientos para el diseño de rutas fuera de la hora punta AM, así como tampoco generar lineamientos para propender por el equilibrio financiero del sistema en general.

Partiendo del lineamiento adicional que se acaba de enunciar, se decide que se van a priorizar los costos para el usuario dentro de la función objetivo que se va a definir. Esto genera las siguientes consecuencias para el proceso de diseño de los distintos conjuntos de rutas:

- No existirá restricción de costo sobre los kilómetros recorridos tanto comerciales como en vacío. El costo por ralentí se considerará incluido dentro de los costos por kilómetro.
- El número de conductores por bus y el área requerida para patios no se considerarán en esta investigación y no tendrán incidencia en la función objetivo.
- El tamaño total de la flota requerida podrá utilizarse como un factor de desempate en caso de que los costos para el usuario sean similares en algunos escenarios. En todo caso, no se puede ignorar el hecho de que un menor requerimiento de flota puede redundar en un servicio con menores intervalos de paso (al mantenerse estable la bolsa de kilómetros) y/o mayor velocidad comercial (al haber menos buses circulando). Esto se vería reflejado en beneficios para el usuario.

Siendo de esta forma, la presente investigación será desarrollada desde la perspectiva del usuario y con la función objetivo se buscará minimizar sus costos, entendidos como los tiempos percibidos de viaje:

$$F_U = a_{acc} \sum_{i=0}^n t_{acc\ i} + a_{esp} \sum_{i=0}^n t_{esp\ i} + a_v \sum_{i=0}^n t_{v\ i} + a_{trans} \sum_{i=0}^n t_{trans\ i} + a_T \sum_{i=0}^n T_i \quad (3.1)$$

Esta función objetivo se forma a través de la suma ponderada de las variables operacionales relativas a los costos del usuario. Donde:

- Los coeficientes  $a_x$  constituyen los factores de ponderación para cada elemento de la ecuación.
- $n$  es el total de usuarios durante el periodo de interés.

Para el caso de estudio que se aborda en este documento, es posible simplificar un poco la Ecuación (3.1) mediante dos supuestos:

- El componente troncal del SITP se modelará como un sistema cerrado y el instante de partida para la simulación será el momento en el que los usuarios se encuentren en la correspondiente plataforma troncal. Por lo tanto, es posible ignorar el tiempo de acceso de los usuarios, entendiéndose este como el tiempo de desplazamiento entre sus orígenes/destinos y la plataforma de la estación. En el caso de usuarios que ingresen al sistema en rutas alimentadoras, tampoco se tendrá en cuenta el tiempo de viaje a bordo del bus alimentador ni el tiempo de caminata desde la plataforma de alimentación hasta la plataforma troncal.
- Para efectos de modelar la tarifa, se tomará esta como una constante dentro de la troncal, de modo que a todos los usuarios les corresponda la misma tarifa plana mientras no salgan del sistema de estaciones, sin importar la ruta o rutas troncales que utilicen. Este esquema refleja el sistema tarifario actual dentro de la troncal de TransMilenio [66] y permitirá ignorar el componente de la tarifa en la función objetivo.

Teniendo en cuenta lo anterior, la función objetivo simplificada resulta ser:

$$F_U = a_{esp} \sum_{i=0}^n t_{esp} + a_v \sum_{i=0}^n t_v + a_{trans} \sum_{i=0}^n t_{trans} \quad (3.2)$$

Las variables operacionales que componen esta ecuación serán estimadas por medio del modelo de transporte en PTV-Visum. A su vez, al conocer el valor de estas variables será posible calcular el valor de la función objetivo en diversos escenarios de modelación, calculando así el impacto operacional de los distintos conjuntos de lineamientos. Dicho de otra forma, la función objetivo es una medida cuantificada del impacto operacional – en los tiempos percibidos de viaje – de los distintos lineamientos propuestos.

De manera complementaria, se cuantificará también el impacto en el tamaño de la flota, escogiéndose como variable representativa el número total de plazas requeridas para satisfacer la demanda de transporte en cada escenario de lineamientos. Teniendo en cuenta que en el sistema troncal de Bogotá operan buses de tres tipologías, la siguiente ecuación permitirá calcular el número de plazas, siendo esta la segunda función objetivo:

$$N_{pl} = N_{f\ dual} * 80 + N_{f\ art} * 160 + N_{f\ biart} * 240 \quad (3.3)$$

Donde:

- $N_{f\ dual}$  corresponde al total requerido de buses duales de 80 pasajeros.
- $N_{f\ art}$  corresponde al total requerido de buses articulados de 160 pasajeros.
- $N_{f\ biart}$  corresponde al total requerido de buses biarticulados de 240 pasajeros.

### 3.1.3 Configuración de los parámetros de la función de impedancia

Para el submodelo de asignación de viajes se ha utilizado el algoritmo basado en intervalos de paso -Headway based- que ofrece el software PTV-Visum [78]. Este submodelo requiere la configuración de una función de impedancia que corresponda a la función objetivo de costos para el usuario -i.e. tiempos percibido de viaje-, la cual se definió en la ecuación (3.2) de la subsección anterior. Para facilidad del lector, se repite esta ecuación a continuación:

$$F_U = a_{esp} \sum_{i=0}^n t_{esp} + a_v \sum_{i=0}^n t_v + a_{trans} \sum_{i=0}^n t_{trans} \quad (3.4)$$

Donde:

- $t_{esp}$ ,  $t_v$ ,  $t_{trans}$  corresponden a los tiempos de espera en el origen, tiempos de viaje a bordo del bus y tiempos de transbordo, respectivamente.
- Los coeficientes  $a_x$  constituyen los factores de ponderación para cada elemento de la ecuación.
- $n$  es el total de usuarios durante el periodo de interés.

Para los coeficientes de ponderación del tiempo de espera en el origen y tiempo de viaje a bordo, se utilizarán los valores clásicos recomendados en la literatura [79]:

$$a_{esp} = 2 \quad (3.5)$$

$$a_v = 1 \quad (3.6)$$

Entre tanto, el tiempo de transbordo tendrá un tratamiento especial debido a su importancia como parámetro diferenciador entre los distintos conjuntos de rutas -algunos lineamientos de diseño tienden a requerir más transbordos que otros-. PTV-Visum permite desagregar el tiempo de transbordo de cada usuario en tres componentes, tal como se aprecia en la ecuación (4.4):

$$t_{trans} = a_{walk\ trans} * t_{walk\ trans} + a_{wait\ trans} * t_{wait\ trans} + P_{trans} * N_{trans} \quad (3.7)$$

Donde:

- **$t_{walk\ trans}$  (Tiempo de caminata para el transbordo):** tiempo de caminata que cada usuario requiere para moverse entre estaciones durante un transbordo. En este modelo se contabiliza el tiempo de caminata para aquellas estaciones interconectadas por un túnel, tales como Ricarte Américas-NQS, Av. Jiménez Av. Caracas-Eje Ambiental, y Aguas-Universidades. No se tiene en cuenta el tiempo de caminata entre las plataformas A, B, C o D de una misma estación.
- **$t_{wait\ trans}$  (Tiempo de espera en el transbordo):** tiempo de espera de cada usuario en las plataformas de estaciones o paraderos mientras le es posible abordar un servicio de transbordo.
- Los coeficientes  $a_x$  constituyen los factores de ponderación para los dos primeros elementos de la ecuación.
- **$P_{trans}$  (Penalización por transbordo):** penalización en tiempo por cada transbordo realizado.
- **$N_{trans}$  (Número de transbordos):** número de transbordos que cada usuario debe realizar para completar su viaje.

Para el tiempo de caminata entre estaciones de transbordo, nuevamente se toma un valor clásico sugerido por la literatura [79]:

$$a_{walk\ trans} = 2 \quad (3.8)$$

En cambio, para los dos coeficientes restantes, se plantea la simulación de tres casos de simulación:

$$\text{Transbordos con penalización baja: } a_{wait\ trans} = 2 \cap P_{trans} = 2,5_{\text{minutos/trans}} \quad (3.9)$$

$$\text{Transbordos con penalización media: } a_{wait\ trans} = 3 \cap P_{trans} = 5_{\text{minutos/trans}} \quad (3.10)$$

$$\text{Transbordos con penalización alta: } a_{wait\ trans} = 4 \cap P_{trans} = 7,5_{\text{minutos/trans}} \quad (3.11)$$

La razón para plantear este esquema es que los escenarios de rutas radiales podrían verse afectados si solo se considera una penalización alta de los transbordos. Lo mismo aplica para las rutas diametrales si los transbordos no se penalizan lo suficiente. La idea entonces es comparar los 6 conjuntos de rutas en tres casos diferentes de penalización de los transbordos, de modo que pueda hacerse una evaluación justa e imparcial de los diferentes conjuntos de lineamientos.

Resumiendo, la función de impedancia -función de costos del usuario, i.e. tiempo percibido de viaje- implementada en PTV-Visum se enuncia a continuación:

$$F_U = 2 * \sum_{i=0}^n t_{esp} + 1 * \sum_{i=0}^n t_v + \sum_{i=0}^n (2 * t_{walk\ trans} + a_{wait\ trans} * t_{wait\ trans} + P_{trans} * N_{trans}) \quad (3.12)$$

### 3.2 Construcción del modelo de transporte

El modelo de transporte, desarrollado en el software PTV-VISUM [72], es la piedra angular de la metodología de investigación propuesta para poner a prueba los diferentes conjuntos de lineamientos para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP.

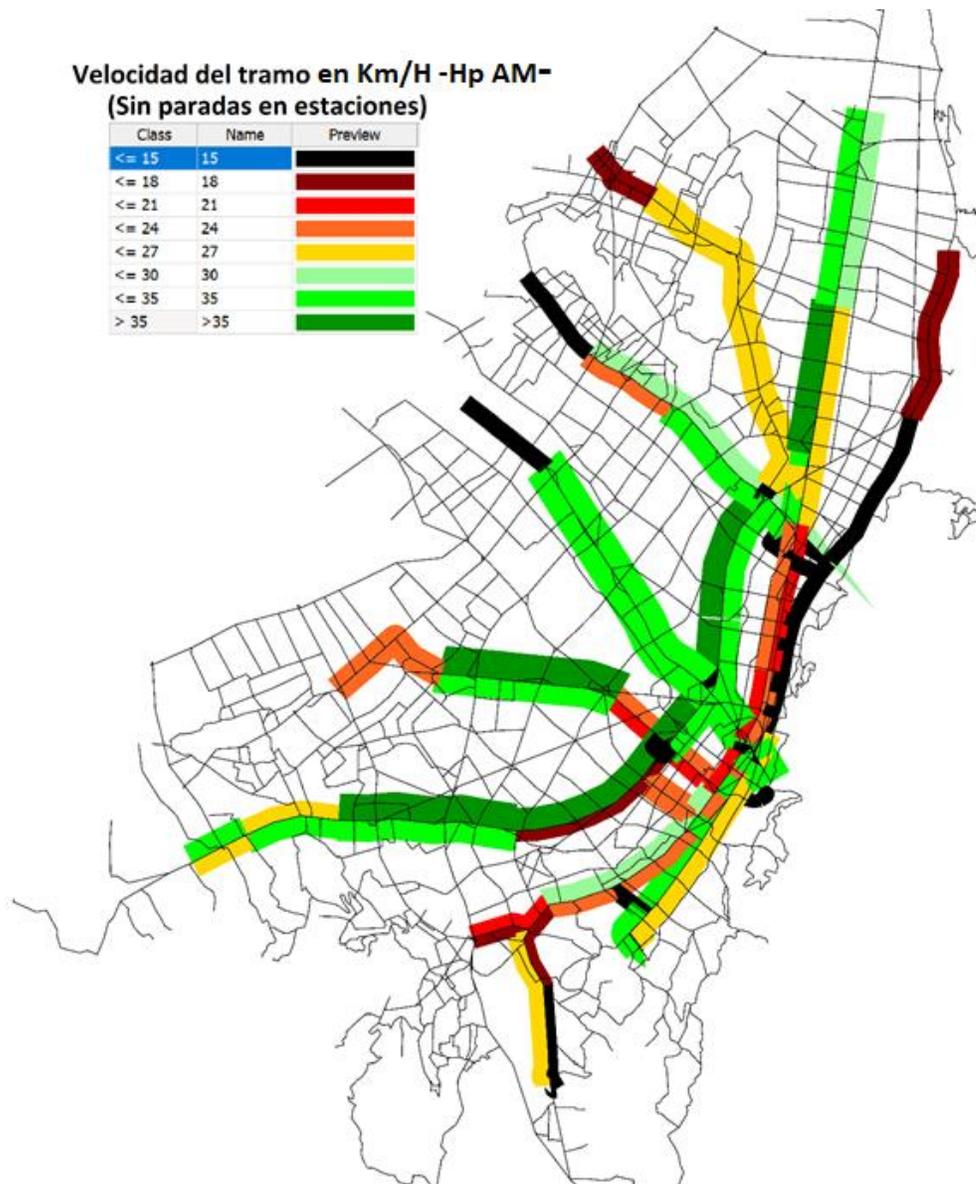
Se trata de un modelo simplificado de la red troncal que incluye portales, estaciones, paraderos de buses duales, corredores viales y los diferentes conjuntos de rutas,

actuales e hipotéticas, del sistema TransMilenio. Además, tal como se detallará en la siguiente sección, se ha desarrollado una matriz interna de viajes entre las estaciones de la red troncal tomando en consideración las rutas con buses duales.

### 3.2.1 Red vial

La Figura 3-2 muestra la red vial implementada para emular el componente troncal del SITP en el modelo de transporte.

**Figura 3-2:** Red vial del modelo de transporte de la red troncal de TransMilenio en 2020.



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Esta red se construyó tomando datos geográficos de referencia de la página de Datos Abiertos [80] de TransMilenio S.A. Los arcos conservan las distancias físicas reales de las avenidas que representan, así como las velocidades de operación reales de los buses. Para esto último se ha tomado como base los tiempos de ciclo programados de las diferentes rutas durante la operación de día hábil -hora punta AM, febrero de 2020 [3]- estableciéndose un promedio de velocidad -sin paradas en estaciones- para cada sección de los diferentes corredores troncales.

Como puede ser visto en la figura, se han incluido todos los interconectores activos a febrero de 2020, y se ha incluido también la Cr. 7, por la cual, pese a no ser un corredor troncal, circulan servicios con buses duales que funcionan a modo de rutas pretroncales.

### 3.2.2 Estaciones del componente troncal

La Figura 3-3 muestra los portales, estaciones y paraderos configurados en el modelo de transporte, de acuerdo con la red troncal existente en febrero de 2020 [81].

**Figura 3-3:** Portales, estaciones y paraderos de la red troncal de TransMilenio en 2020.



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

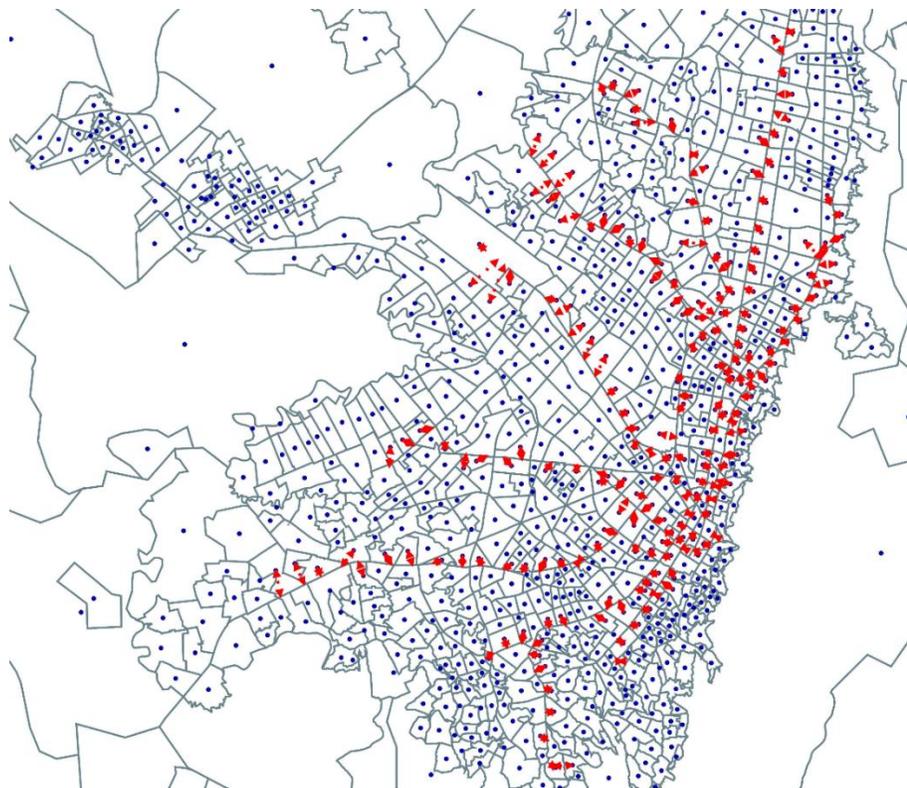
Como puede verse, se han incluido los paraderos de las rutas duales que se encuentran en el corredor no troncal de la Cr. 7 y en los tramos no troncales de la Av. Suba, Cl. 80, Cl. 26, Av. Caracas Sur, entre otras.

Para cada estación y paradero es posible configurar un tiempo de parada, en caso de que un servicio se detenga en ese punto. Para efectos de la simulación se ha establecido, de manera general, una demora de 35 segundos por parada, los cuales se irán sumando al tiempo de ciclo de cada ruta al momento de ser dibujada en el software. Los 35 segundos incluyen los efectos de la desaceleración y el arranque de los buses, junto con el tiempo de abordaje de los usuarios. No incluyen el tiempo que se pierde por culpa de las filas de buses en las estaciones más congestionadas.

### 3.2.3 Zonas de transporte y conectores

Para el modelo de transporte se han utilizado las zonas ZAT, según el marco de referencia establecido en la Encuesta de Movilidad de 2019 [52].

**Figura 3-4:** Zonas y conectores del modelo de transporte.



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Sin embargo, la matriz de viajes se ha implementado tomando como orígenes y destinos las estaciones del componente troncal. Esto implica que debe idearse una forma de interrelacionar estaciones con zonas ZAT. Para tal fin, se ha asociado cada portal, estación y paradero con una zona ZAT de manera unívoca, mediante un único conector bidireccional -flechas rojas en la Figura 3-4-. A nivel de capas geográficas, la demanda es inyectada en una zona ZAT por cuyo conector único deben entrar y salir todos sus viajes. Este conector transmite los viajes directamente a la estación asociada, y de este modo, se logra establecer una relación unívoca entre zonas ZAT y estaciones.

La razón detrás del método escogido es que trabajar desde el principio con zonas ZAT facilitará una futura ampliación del modelo de transporte para tener en cuenta otros componentes del SITP y otros modos, tales como la bicicleta o el transporte privado.

### **3.3 Matriz origen-destino del componente troncal**

En esta sección se presentará la matriz origen-destino de hora punta AM que será usada durante el proceso de modelación, y se explicará el proceso para su construcción.

#### **3.3.1 Fuentes de información base**

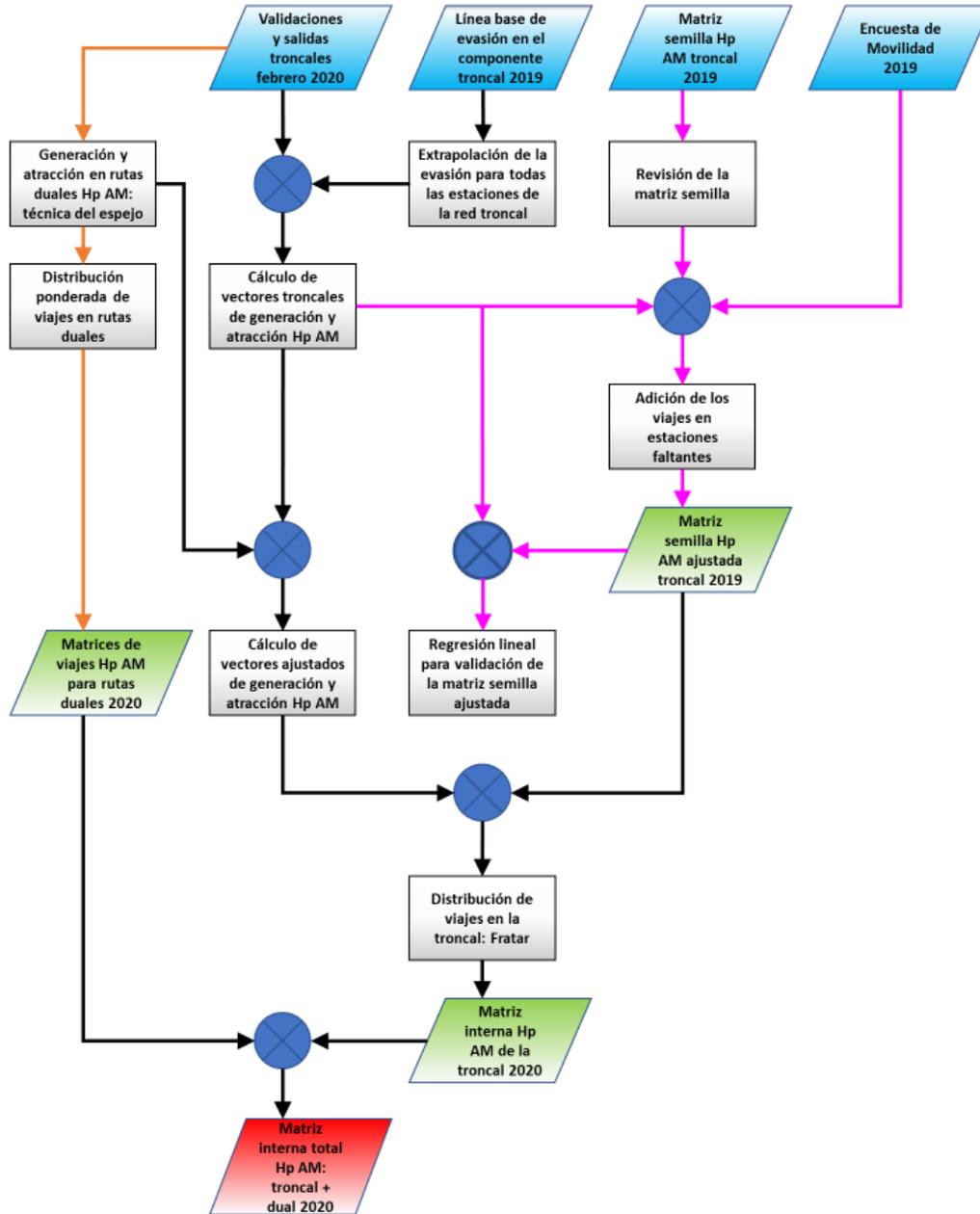
Para la elaboración de la matriz se han tomado cuatro fuentes de información:

- Registros de validaciones y salidas troncales para febrero de 2020, tomados de la página de datos abiertos de TransMilenio S.A. [82]
- “Línea base de evasión al pago de la tarifa en el componente troncal del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá” [83], estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia para TransMilenio S.A. y entregado en 2019.
- Matriz semilla de hora punta AM calibrada para 2019 de los viajes entre estaciones troncales, suministrada por TransMilenio S.A.
- Encuesta de Movilidad 2019 de la Secretaria Distrital de Movilidad, datos tomados del portal SIMUR de la Alcaldía de Bogotá [84].

### 3.3.2 Proceso para la construcción de la matriz

La Figura 3-5 ilustra el proceso que se ha seguido para calcular la matriz origen-destino interna de la troncal de TransMilenio, incluyendo los viajes en las rutas que operan con buses duales con tramos de su recorrido por fuera de los corredores troncales.

**Figura 3-5:** Diagrama de flujo para el cálculo de la matriz interna de la red troncal.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, existen 4 caminos principales en el flujo de procesos, cada uno representado por un color en el diagrama:

**Estimación de matrices internas de viajes para las rutas duales (Flujo en naranja):**

Debido a que la matriz semilla no contiene los viajes que se dan en las rutas duales por fuera de los corredores troncales, y a que se ha considerado conveniente incluir estos viajes para darle mayor precisión al modelo de transporte a la hora de evaluar la función objetivo establecida en la sección anterior, se ha decidido estimar la matriz interna de viajes de cada ruta dual por separado. El proceso ha sido realizado en dos pasos:

- **Generación y atracción de viajes:** para cada ruta dual, de manera independiente, se han estimado los vectores de generación y atracción de viajes. Los vectores de generación se han calculado con base en los registros de validaciones de hora punta AM en los buses duales. Mientras tanto, para estimar los vectores de atracción se ha utilizado la técnica conocida como “espejo”, usando las validaciones de cada ruta en el sentido contrario durante la hora punta PM. Si bien, la técnica del espejo puede tener cierto margen de error al asumir que cada pasajero que toma la ruta en la mañana la utiliza nuevamente para devolverse en la tarde-noche, este margen de error resulta aceptable en el contexto del ejercicio actual. Por su experiencia en planeación con concesionarios del SITP, el investigador considera que el 80% de los destinos serán correctamente estimados usando esta técnica. Un enfoque más riguroso, que podría ser implementado en un estudio posterior, es recolectar directamente en campo la información sobre los orígenes y los destinos de los viajes de los usuarios de estas rutas, mediante aforos a bordo de los buses. Sin embargo, esto queda por fuera del alcance del presente proyecto y además, actualmente no es posible hacerlo debido al impacto en la movilidad ocasionado por la pandemia del coronavirus.
- **Distribución ponderada de viajes:** contando con los vectores de generación y atracción, se ha realizado una distribución de los viajes entre los diferentes puntos de parada de cada ruta. Para ello, se ha tomado como criterio numérico el peso ponderado de los viajes que se validan en cada paradero, en el horario y en el sentido contrarios. Por ejemplo, si un paradero determinado abarca el 20% de las validaciones en el sentido “vuelta” hora punta PM, se asume entonces que ese

paradero es el destino del 20% de los viajes que se originan en cada uno de los paraderos generadores, en el sentido “ida” hora punta AM. Nuevamente, se aclara que este método solo permite obtener una aproximación de la matriz interna de cada ruta y que un aforo en campo mejoraría la calidad de la información. Sin embargo, para los objetivos de esta investigación se utilizarán estos datos, que aunque son aproximados, permiten tener una noción general del comportamiento de los viajes realizados a bordo de los buses duales.

La salida final de esta parte del proceso está constituida por las matrices origen-destino con los viajes internos estimados de cada una de las rutas duales, calibradas con datos de febrero de 2020.

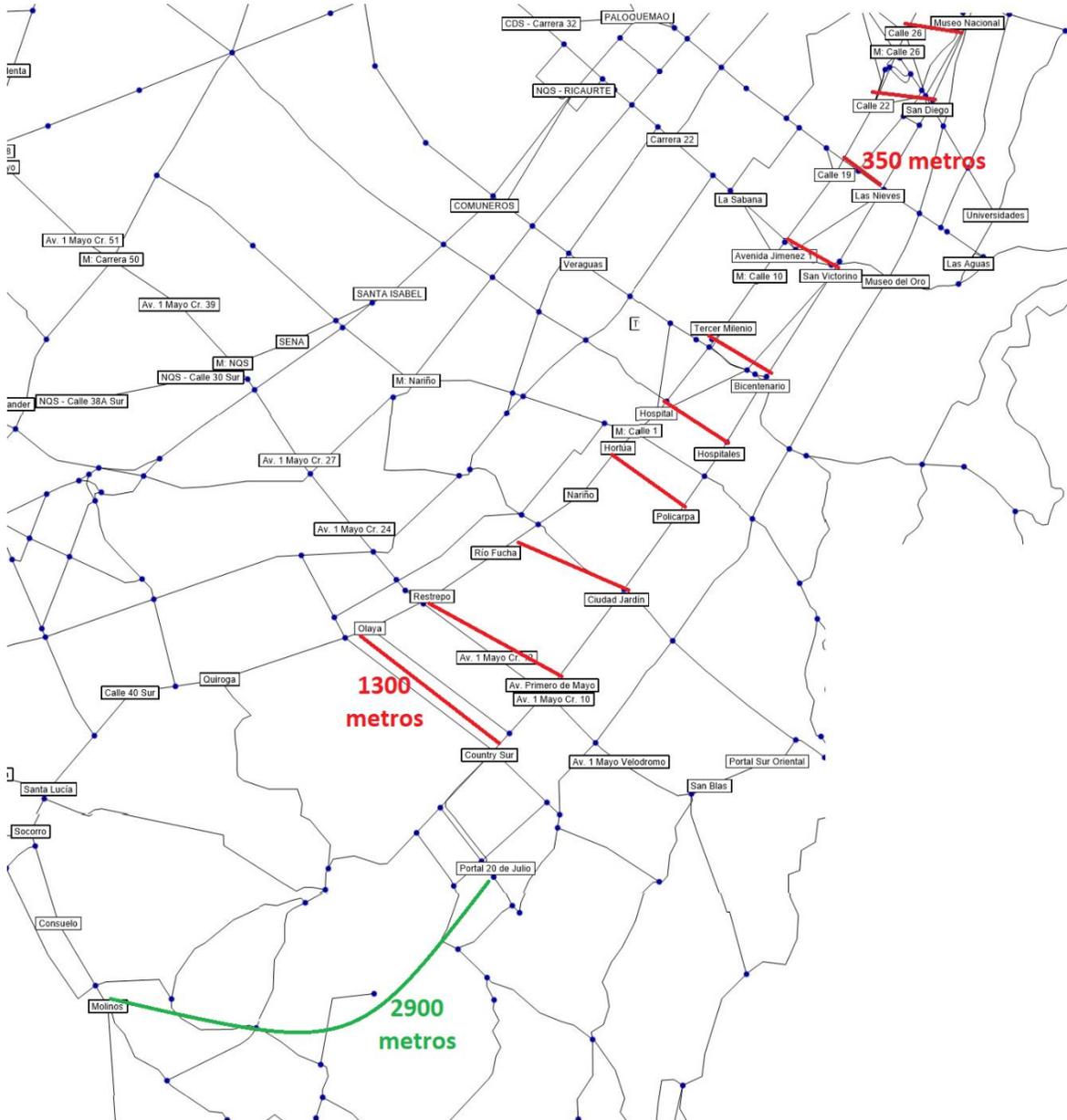
#### **Ajuste de la matriz semilla troncal (Flujo en magenta):**

La matriz semilla ha sido suministrada por TransMilenio S.A. y está calibrada para un día hábil típico del año 2019. Sobre esta matriz se han ejecutado los siguientes procesos:

- **Revisión de la matriz semilla:** lo primero fue revisar la coherencia de la matriz y que no tuviera huecos en los viajes generados desde las diferentes estaciones de la red troncal. De este modo, se evidenció que la matriz no contenía los viajes que se generan en la troncal de la Cr. 10. Por lo tanto, se procedió a rellenar los viajes faltantes.
- **Adición de los viajes faltantes:** para completar los viajes faltantes se ha establecido un paralelismo entre las estaciones de la Cr. 10 y sus equivalentes más cercanos de la Av. Caracas. El principio adoptado es que los viajes originados desde estaciones equivalentes deben tener destinos similares a lo largo y ancho de la ciudad, partiendo del precepto de que el hecho de que una persona viva más cerca de uno u otro corredor troncal -siendo estos paralelos y muy cercanos, separados por 1300 metros como máximo- no debería influir en el destino de sus viajes durante la hora punta AM. Adicionalmente, se ha combinado la información de los viajes de la Encuesta de Movilidad 2019 y los datos de las validaciones y salidas registradas en los torniquetes de las estaciones de la Cr. 10, para estimar la estación de origen y la estación de destino de los viajes desde y hacia esta troncal. La Figura 3-6 ilustra la equivalencia geográfica considerada entre la troncal Av. Caracas y la troncal Cr. 10. Como caso especial, para el Portal

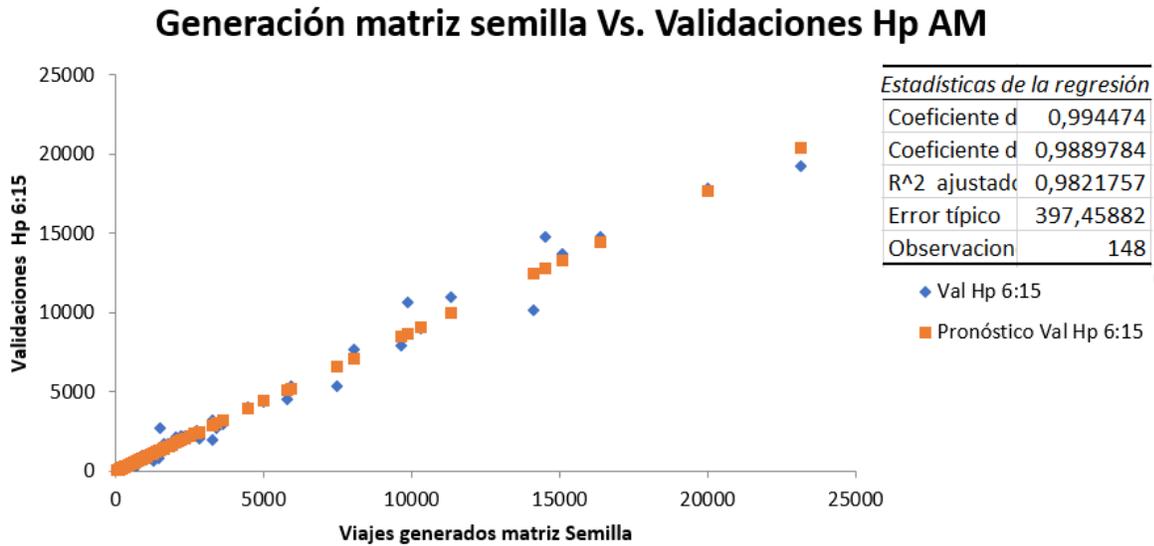
del 20 de Julio se ha elegido hacer la equivalencia con la estación de Molinos, dado que ambas reciben rutas alimentadoras provenientes del suroriente de la ciudad.

**Figura 3-6:** Equivalencia geográfica entre las estaciones de la Cr. 10 y la Av. Caracas.



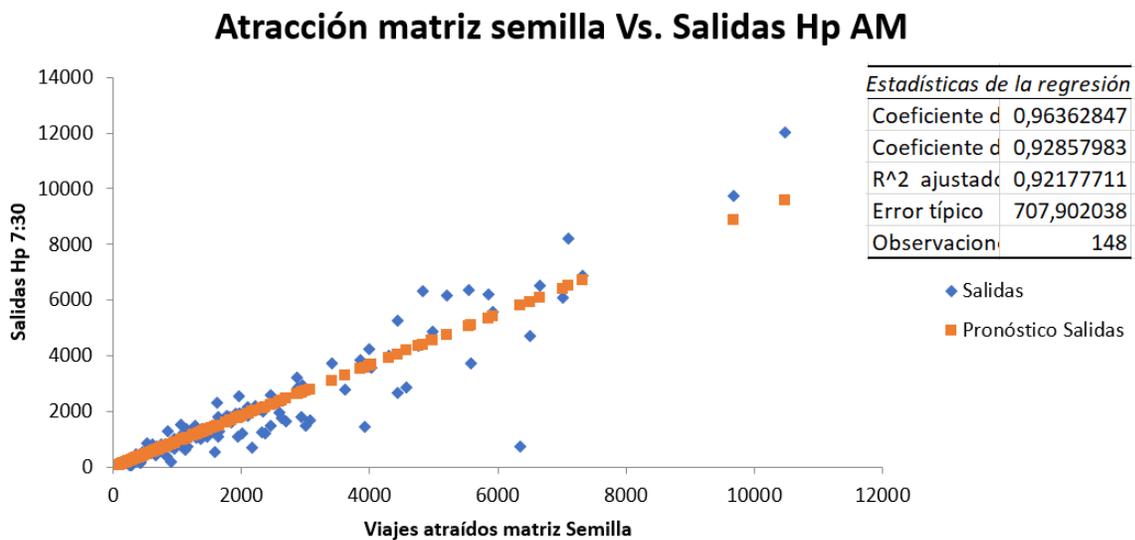
Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Figura 3-7:** Regresión lineal de viajes generados por estación en la matriz semilla y validaciones de torniquetes en hora punta AM



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-8:** Regresión lineal de viajes atraídos por estación en la matriz semilla y salidas de torniquetes en hora punta AM



Fuente: Elaboración propia.

- **Regresión lineal para validación de la matriz semilla:** La salida obtenida en el camino color magenta es la matriz semilla de la troncal para 2019, revisada y sin

huecos. Para verificar su validez se ha realizado una regresión lineal entre los vectores de generación y atracción de la matriz semilla y los vectores obtenidos de las validaciones y las salidas de los torniquetes para febrero de 2020. Tal como ilustran la Figura 3-7 y la Figura 3-8, el grado de correlación es bastante alto y por ende, se considera adecuado proceder con esta matriz semilla ajustada.

#### **Estimación de la matriz interna troncal + dual (Flujo en negro):**

El sendero marcado por las flechas en negro puede considerarse como el camino principal en el flujo del proceso. Esto debido a que invoca las salidas obtenidas en los demás senderos y finaliza con el producto final que se desea obtener: la matriz origen-destino troncal + dual 2020.

- **Extrapolación de la evasión en las estaciones de la red troncal:** en primer lugar, tomando como referencia el estudio “Línea base de evasión al pago de la tarifa en el componente troncal del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá” [83], entregado por la Universidad Nacional de Colombia en el año 2019, se han estimado los porcentajes de evasión del pago en las estaciones del componente troncal. El estudio citado contempló 40 estaciones de la red y para estas, se ha tomado el valor hallado para la hora punta AM. Para las demás estaciones se ha extrapolado un porcentaje de evasión de acuerdo a su cercanía geográfica con una o varias de las 40 estaciones que aparecen en el documento base.
- **Cálculo de vectores troncales de generación y atracción:** en segundo lugar, tomando como fuente primaria los datos de validaciones y salidas en los torniquetes, se han calculado los vectores de generación y atracción de las estaciones de la red troncal. Sobre el vector de generación se ha aplicado una corrección equivalente al porcentaje de evasión determinado en el punto anterior para cada estación.
- **Ajuste de los vectores de generación y atracción:** para evitar que los viajes que se realizan desde o hacia estaciones del sistema troncal en las rutas duales queden duplicados en la matriz que se obtendrá, de los vectores de generación y atracción obtenidos en el punto anterior se restarán estos viajes, los cuales ya están incluidos dentro de las matrices internas generadas para las rutas duales. Por ejemplo, los viajes que se realicen en la ruta dual M86 desde el portal El Dorado serán eliminados del vector de generación troncal para no contarlos dos

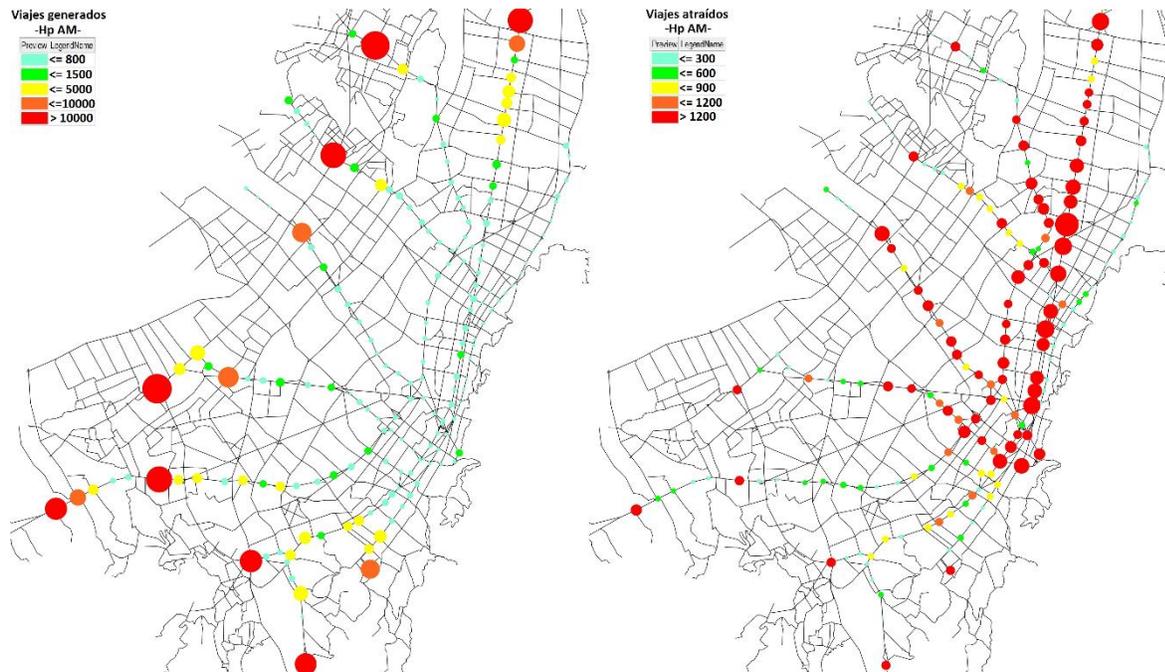
veces. Así mismo, los viajes que en esta ruta tengan como destino la estación Museo Nacional serán restados del vector de atracción troncal.

- **Distribución de viajes -Fratat-:** se ha desarrollado un proceso de distribución de viajes con el método de Fratar, tomando como entradas los vectores de generación y atracción troncales calibrados a 2020 y la matriz semilla de 2019. Después de ocho iteraciones se ha logrado un nivel de precisión de 3 cifras decimales en los valores hallados. La matriz troncal obtenida se ha sumado con las matrices para las rutas duales. Este proceso ha producido como resultado final la matriz de viajes en los componentes troncal y dual, calibrada a febrero de 2020.

### 3.3.3 Matriz resultante

La matriz resultante tiene un total de 265 mil viajes para la hora punta AM -06:15 a 07:15-, abarca la red troncal de TransMilenio y sus rutas con buses duales, y tiene en cuenta el efecto de la evasión según el documento base consultado. Esta matriz será utilizada para todos los escenarios de modelación: se considerará que la demanda es constante.

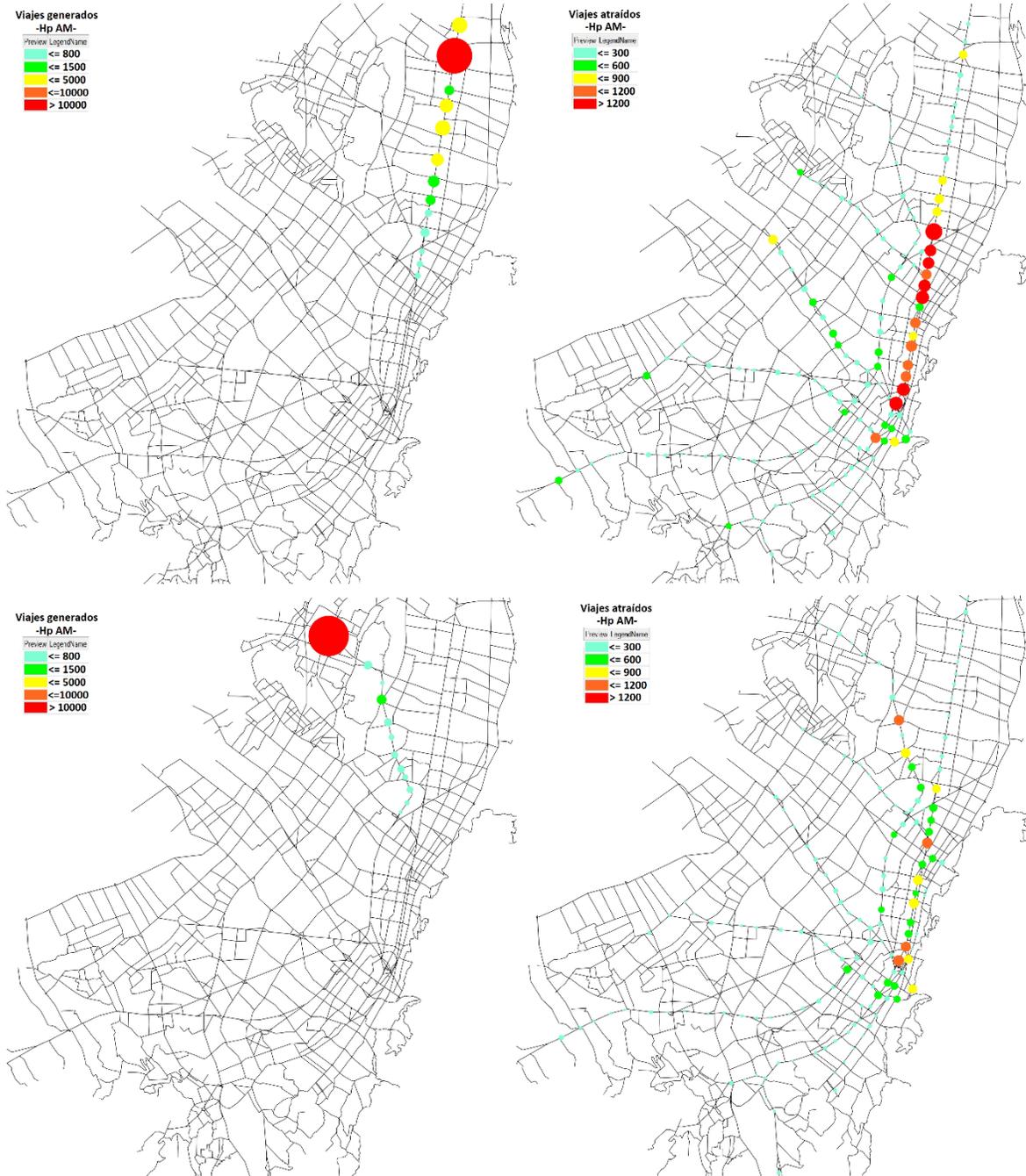
**Figura 3-9:** Origen y destinos de los viajes en el componente troncal hora punta AM



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

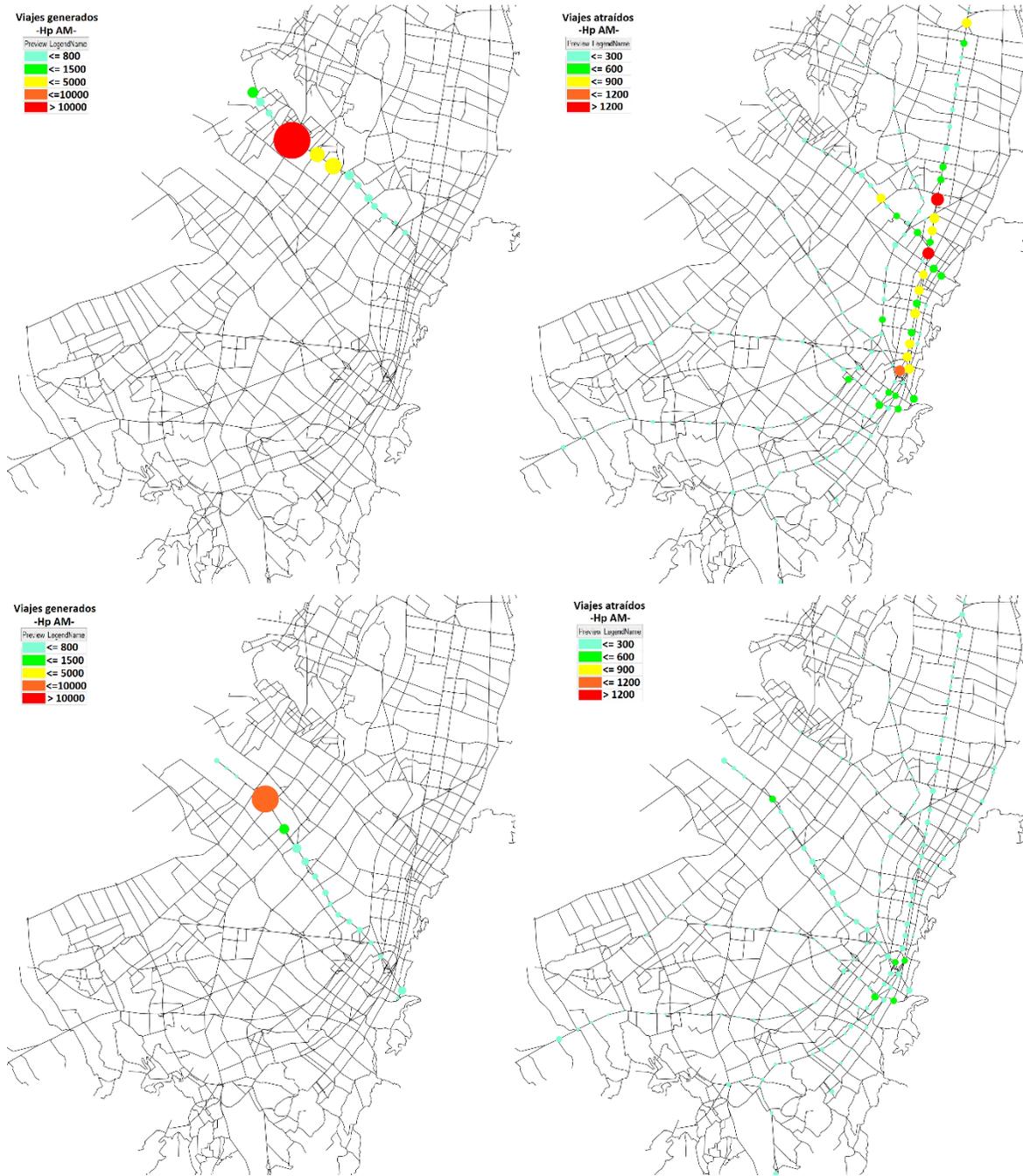
La Figura 3-9 muestra los viajes generados y atraídos en la hora punta AM para todas las estaciones del sistema troncal, según la matriz final obtenida. Adicionalmente, en las siguientes figuras se presentan los orígenes y destinos para cada corredor troncal que posea un portal.

**Figura 3-10:** Origen de los viajes en los corredores Autonorte y Av. Suba, y destinos



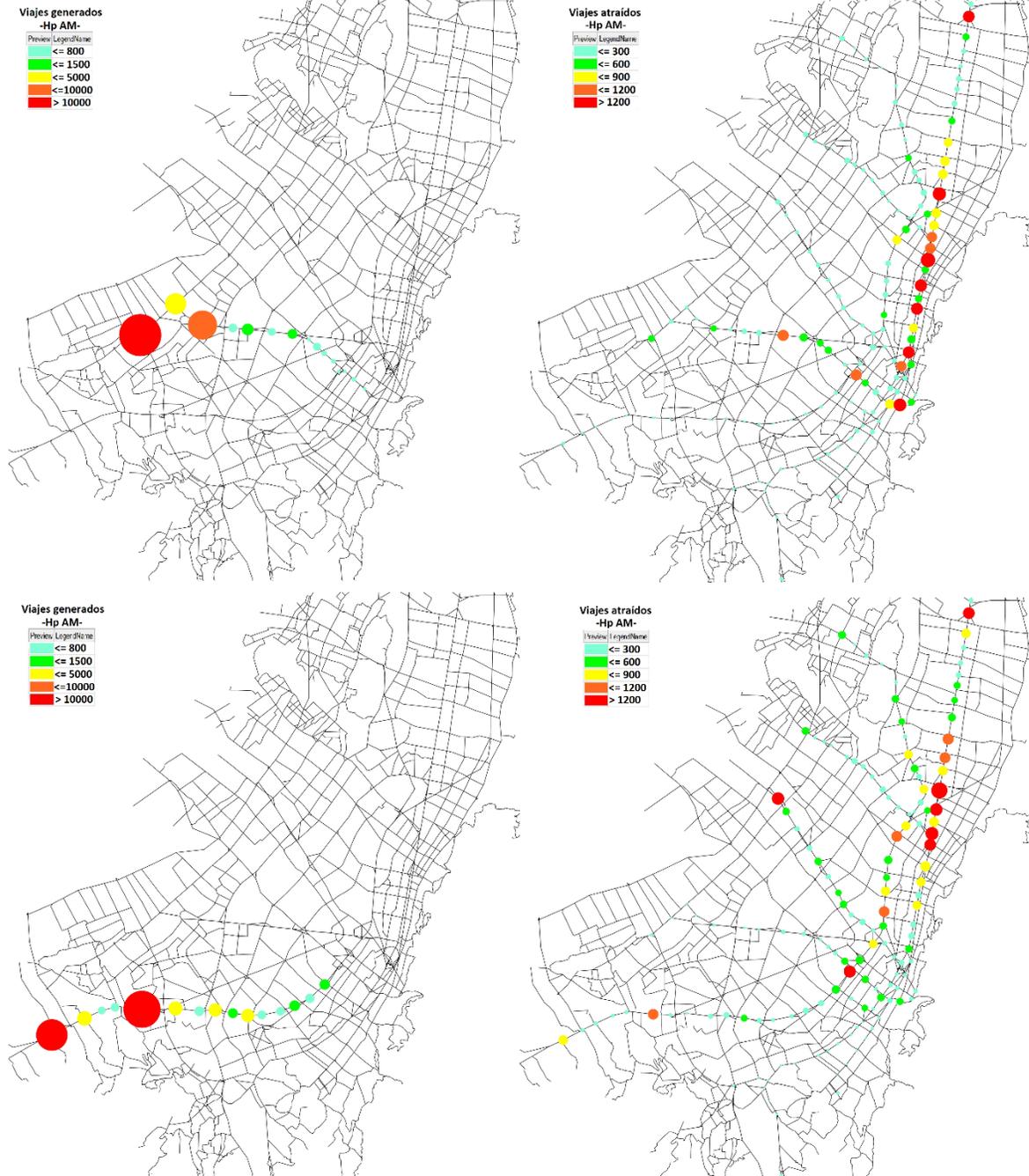
Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Figura 3-11: Origen de los viajes en los corredores Calle 80 y Calle 26, y destinos



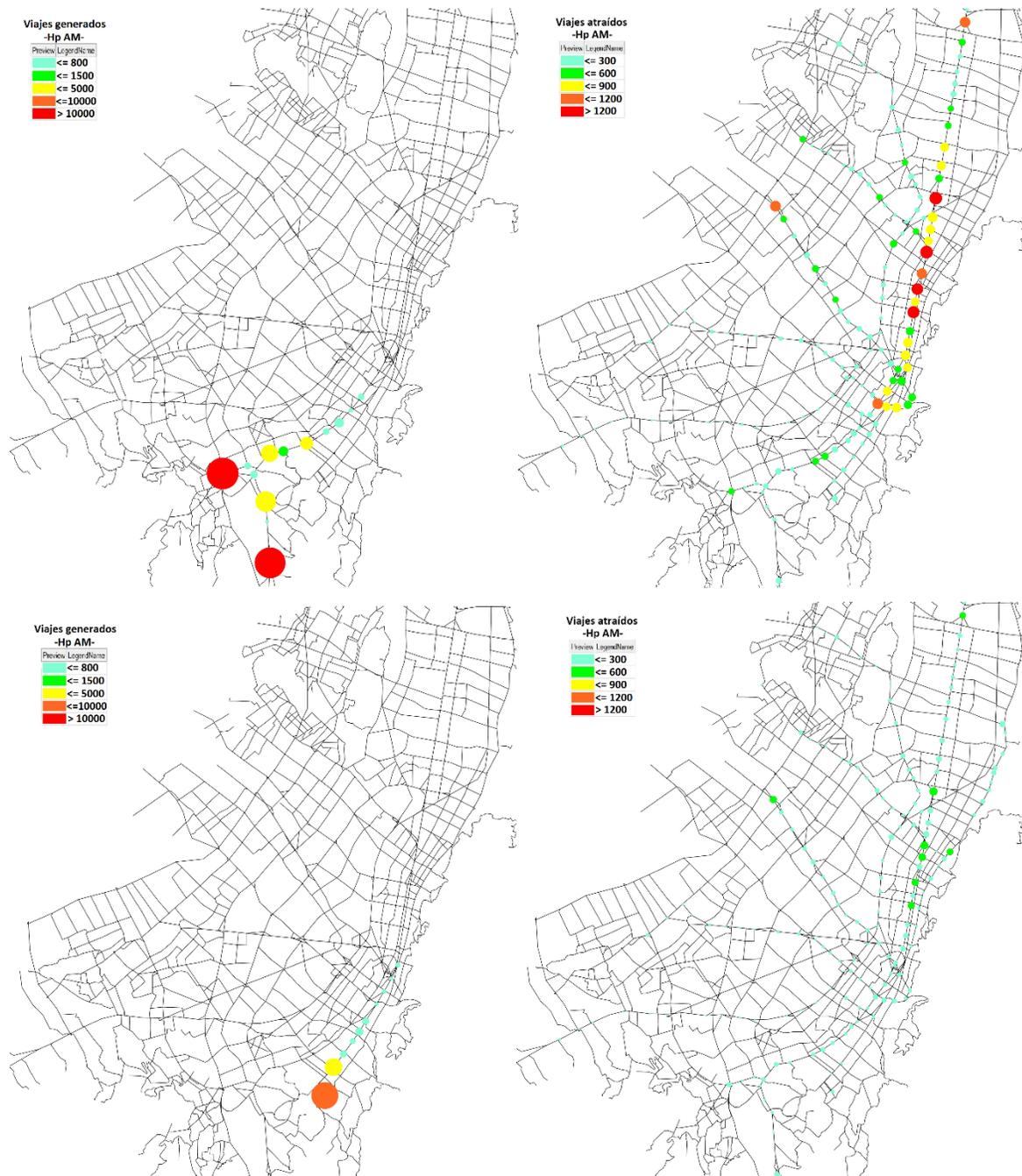
Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Figura 3-12:** Origen de los viajes en los corredores Av. Américas y Autosur, y destinos



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Figura 3-13:** Origen de los viajes en los corredores Av. Caracas Sur y Cr. 10, y destinos

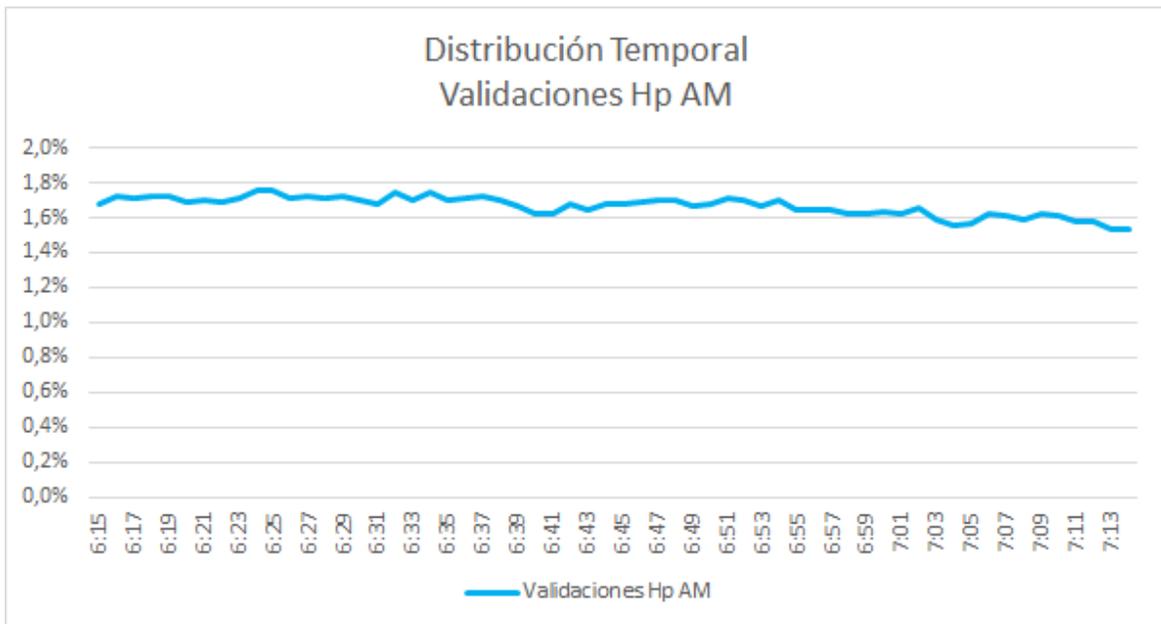


Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

La desagregación geográfica de los datos, presentada en las cuatro figuras anteriores, será una herramienta valiosa al momento de diseñar la red de rutas en los diversos escenarios.

Finalmente, se ha revisado la distribución temporal de las validaciones, minuto a minuto, a lo largo de la hora punta AM. La Figura 3-14 muestra la distribución obtenida sumando las validaciones de los componentes troncal y dual. Allí se puede evidenciar que los usuarios arriban al sistema de transporte de una manera relativamente uniforme durante la hora punta. Esta distribución ha sido replicada en el modelo de transporte para simular el comportamiento en el tiempo de la demanda de viajes.

**Figura 3-14:** Distribución temporal de las validaciones troncales y duales hora punta AM



Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Generación de escenarios de simulación

Los escenarios de simulación que se plantearán en esta sección complementarán el modelo de transporte para evaluar el impacto específico – tiempos percibidos de viaje y flota requerida – de cada conjunto de lineamientos descrito en la sección 2.3. Para lograr lo anterior, todos los escenarios tendrán en común la matriz de viajes, la red vial, las estaciones y las zonas de transporte del modelo. No obstante, cada escenario tendrá una red de rutas específica, construida a partir de los procesos heurísticos que se presentan a continuación. Estos procesos deben entenderse como el componente de la metodología que permitirá convertir los diferentes conjuntos de lineamientos propuestos en redes de rutas que se puedan integrar al modelo de transporte.

### 3.4.1 Heurística para el diseño de las redes de rutas troncales

En primer lugar, es necesario aclarar que la heurística<sup>1</sup> que se presenta en esta subsección debe ser considerada como un proceso ideado haciendo uso de la principal bibliografía estudiada - [5] y [26]- y del conocimiento y la experiencia del investigador en diseño de rutas en el transporte público de la ciudad de Bogotá. De ningún modo se pretende dar a entender que esta heurística equivalga a un proceso optimizado de diseño de rutas ni que sea superior a otras metodologías existentes. Más bien, debe considerarse que la heurística presentada es una aproximación posible, entre muchas otras, para abordar el problema del diseño de la red de rutas de una forma práctica y con bajo costo computacional, cumpliendo con lo enunciado en los diferentes conjuntos de lineamientos establecidos en la sección 2.3.

En este punto, es conveniente recordar algo expresado al comienzo del capítulo 1 de este libro: el diseño integral de una ruta de transporte público implica determinar, como mínimo, los siguientes aspectos [5]:

- Trazado geográfico sobre la red vial.
- La ubicación de los puntos de parada.
- El tiempo de ciclo de cada recorrido a lo largo de su horario de operación.
- La tipología de las unidades transportadoras.
- Los intervalos de paso a lo largo de su horario de operación.

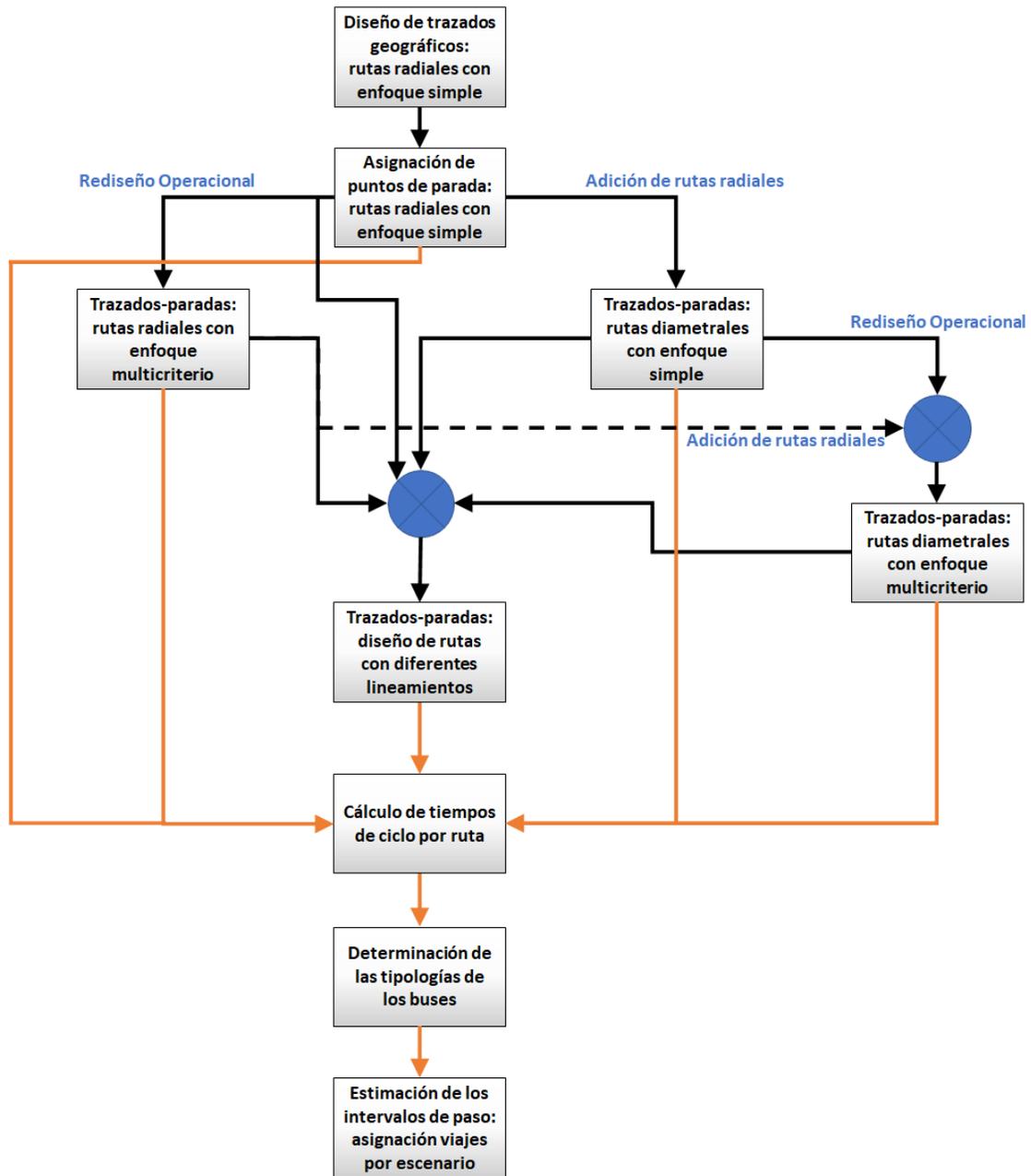
En esta subsección se abordará lo relativo a trazados geográficos y ubicación de puntos de parada. Por otro lado, tal como se enunció en la sección 1.1, determinar los tiempos de ciclo de una ruta hace parte de un problema de corte estadístico que se encuentra fuera del alcance de la presente investigación. En su lugar, tal como se explicó en la subsección 3.2.1, los arcos de la red vial del modelo de transporte contienen la velocidad promedio programada para la operación de las distintas rutas troncales durante la hora punta AM, con datos de febrero de 2020, y cada estación de la red tiene asociado un tiempo de parada. De este modo, al construir las redes de rutas de los distintos

---

<sup>1</sup> **Heuristic procedure:** a procedure or algorithm that does not result for sure in an optimum solution [1]

escenarios, el software PTV-Visum podrá calcular automáticamente los tiempos de ciclo de cada servicio creado para la hora punta AM de día hábil típico. Complementariamente, lo relativo a la tipología de las unidades transportadoras y los intervalos de paso será abordado en el siguiente capítulo.

**Figura 3-15:** Diagrama de flujo de alto nivel de la heurística para el diseño de las redes de rutas en los escenarios correspondientes a los distintos conjuntos de lineamientos.



Fuente: Elaboración propia.

Habiendo realizado las aclaraciones anteriores, la Figura 3-15 muestra el diagrama de flujo de alto nivel correspondiente al proceso heurístico de diseño de redes de rutas para los escenarios que se plantearán.

En primer lugar, se generarán los trazados geográficos y se asignarán los puntos de parada para las rutas del “Escenario 1: rutas radiales con enfoque de diseño simple”. De estas rutas se derivarán otros dos escenarios. Por un lado, mediante la adición geográfica de los trazados radiales y sin modificar las paradas asignadas para cada tramo de origen, se obtendrán las rutas del “Escenario 2: rutas diametrales con enfoque de diseño simple”. Paralelamente, mediante un proceso de rediseño operacional, conservando la base de trazados geográficos radiales, se generarán las rutas del “Escenario 3: rutas radiales con enfoque de diseño multicriterio”. Además, tomando elementos del Escenario 2, y fusionando las rutas radiales del Escenario 3, se derivarán las rutas del “Escenario 4: rutas diametrales con enfoque de diseño multicriterio”.

Finalmente, tomando elementos de todos los escenarios anteriores, se realizará el diseño de las rutas del “Escenario 5: rutas con diferentes lineamientos”.

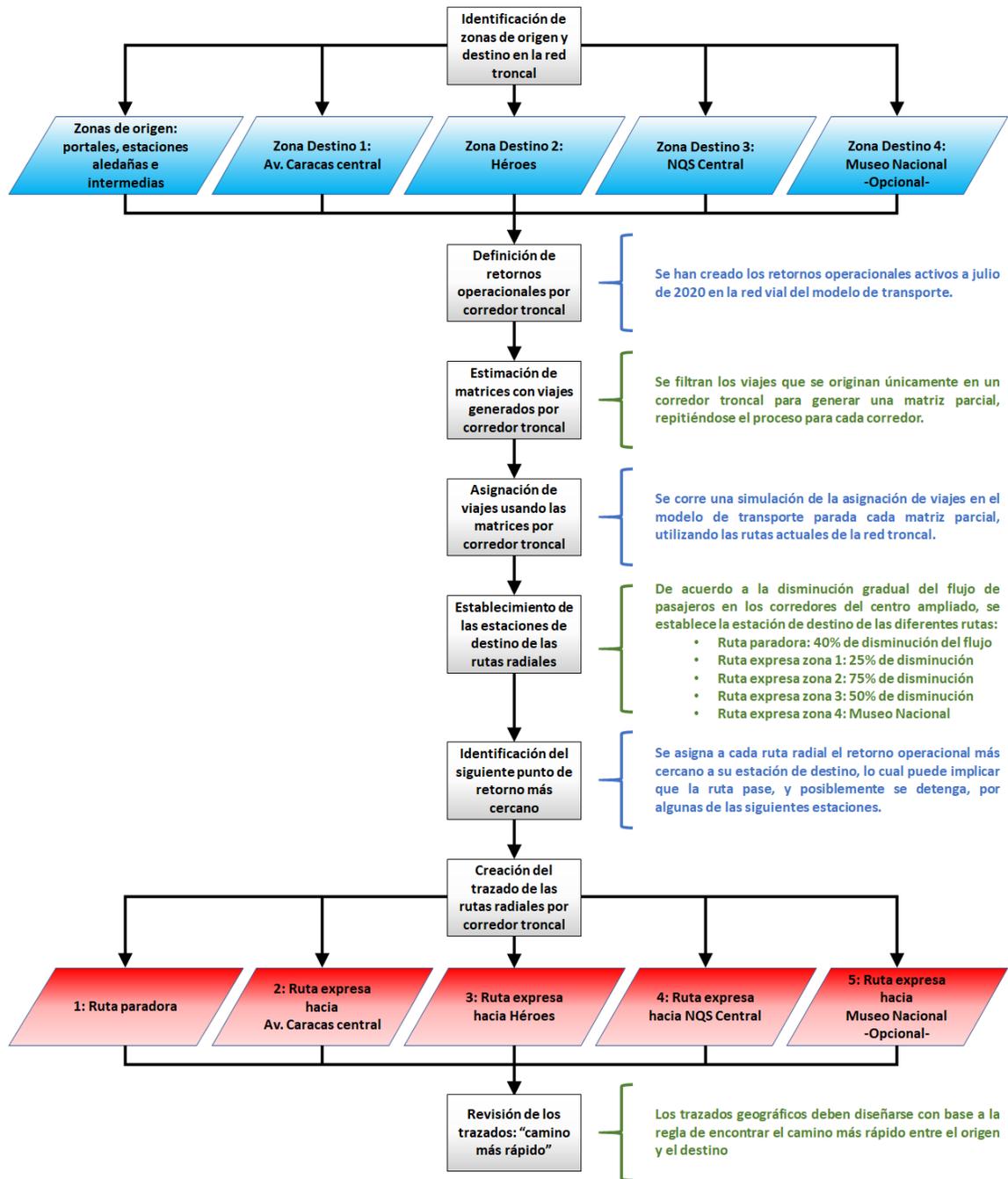
La Figura 3-15 también muestra que el cálculo de los tiempos de ciclo de las rutas se realizará una vez estén definidos los trazados geográficos y los puntos de parada, utilizando la mecánica que se explicó brevemente hace unos cuantos párrafos. Adicionalmente, siguiendo el flujo del diagrama, los siguientes pasos son la determinación de las tipologías de los buses y la estimación de los intervalos de paso de los servicios, temas que serán abordados en el capítulo 4, como ya se dijo.

### **Diseño de trazados geográficos de rutas radiales con enfoque simple:**

Entrando ahora sí al tema específico de esta subsección, la Figura 3-16 muestra el diagrama de flujo del proceso heurístico propuesto para el diseño de trazados geográficos de rutas radiales simples. Este proceso se considera aplicable para un corredor troncal de origen, i.e. un ramal de la troncal que comienza en un portal generador de viajes y termina justamente entrando al centro ampliado de la ciudad. En la subsección 3.3.3, de la Figura 3-10 a la Figura 3-13, se ilustran los corredores troncales

de origen considerados en esta investigación, los cuales corresponden a los corredores estándar de la nomenclatura utilizada públicamente por TransMilenio S.A. [2]

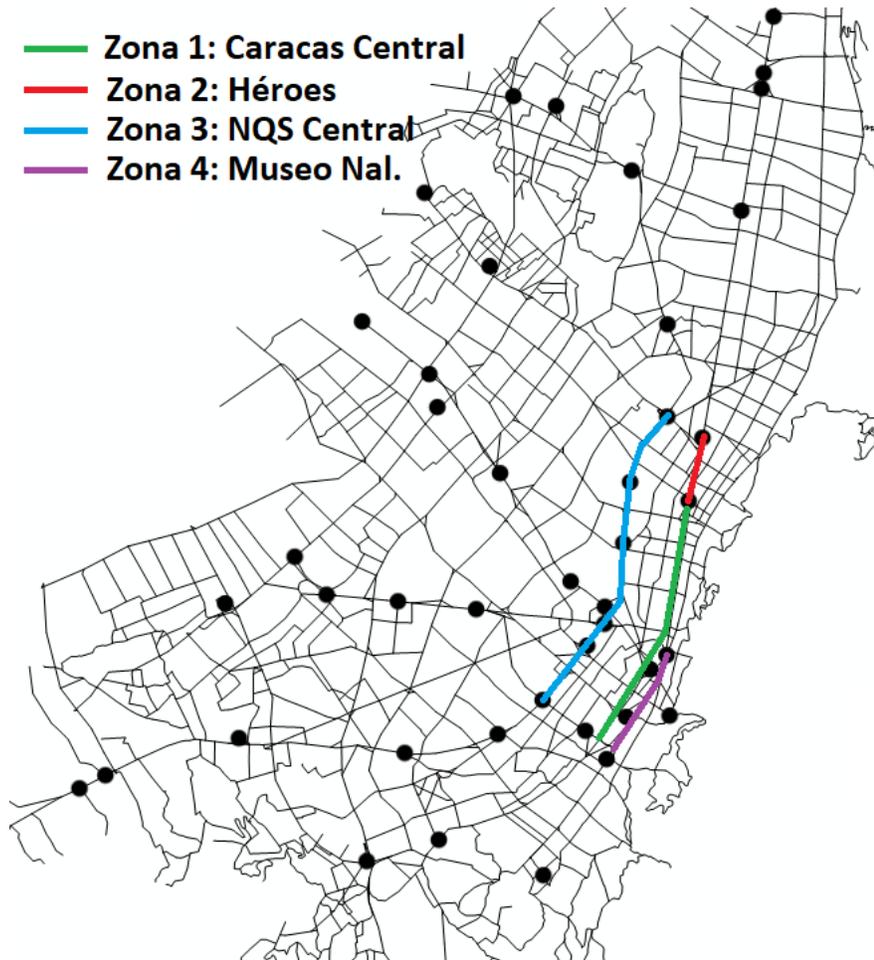
**Figura 3-16:** Diagrama de flujo de la heurística para el diseño de trazados geográficos de rutas radiales con enfoque de diseño simple.



Fuente: Elaboración propia.

Tal como se podrá deducir, la heurística presentada en la página anterior debe ser ejecutada para cada corredor troncal de origen. Para comenzar, el análisis presentado en la subsección 3.3.3 permite identificar tres zonas principales de destino:

**Figura 3-17:** Zonas de destino y retornos operativos de la red troncal de TransMilenio.



Fuente: Elaboración propia.

- **Zona destino 1:** Av. Caracas Central, entre estación Tercer Milenio y Estación Calle 63.
- **Zona destino 2:** Héroes, abarcando la Av. Caracas entre estación Flores y Estación Héroes.
- **Zona destino 3:** NQS Central, entre estación Ricaurte y Estación Calle 75.

Existe una cuarta zona, que si bien no atrae tantos viajes como las tres primeras, podría ser considerada como un destino opcional en algunos casos:

- **Zona destino 4:** Museo Nacional, abarcando la Cr. 10 entre estación San Victorino y Estación Museo Nacional.

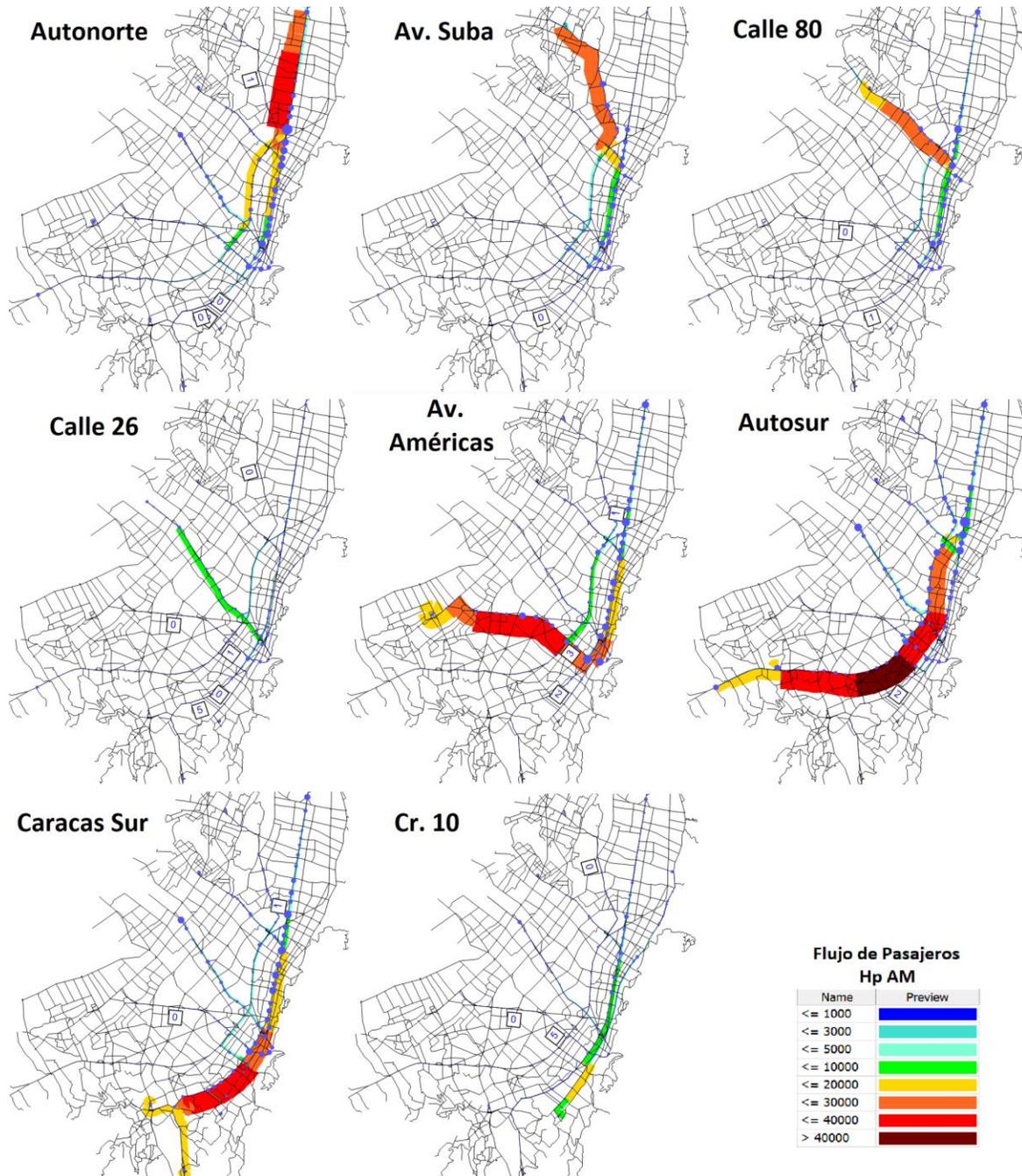
Bajo el paradigma de simplicidad en el diseño, un corredor troncal no necesariamente habrá de tener una ruta expresa que conecte directamente con la estación Museo Nacional. En cambio, será obligatorio que en cada corredor de origen existan rutas expresas que conecten con cada una de las tres zonas de destino principales, además de la ruta paradora que deberá conectar con alguna de estas zonas también.

Para definir las zonas de destino también se han tenido en cuenta los retornos operacionales activos en julio de 2020, tal como se muestra en la Figura 3-17. En esta figura los círculos negros corresponden a los diferentes retornos operacionales identificados en la red vial. Estos retornos toman especial relevancia a la hora de diseñar rutas radiales, puesto que estas requieren de un sitio apropiado para que los buses puedan girar y empezar el recorrido de vuelta.

Continuando con el flujo descrito en el proceso heurístico, la Figura 3-18 muestra las asignaciones de viajes obtenidas usando matrices que contienen solamente los viajes que se originan en cada corredor troncal por separado. Para estas simulaciones se ha utilizado la red actual de rutas de TransMilenio.

En el siguiente paso, se define la estación de destino para cada ruta según la disminución gradual del flujo de pasajeros sobre su corredor de destino en la respectiva asignación de viajes. Por ejemplo, si en su punto de máxima carga un corredor de destino presenta un flujo de 20.000 pasajeros/hora en la simulación con los viajes originados desde un determinado corredor de origen, la ruta paradora tendrá como destino aquella estación donde el volumen de pasajeros del corredor de destino haya disminuido en un 40%, respecto a los 20.000 originales. Luego, se establece el punto de retorno de la ruta simplemente como aquel que sea el más cercano a la estación de destino definida. Para las demás rutas se repite el proceso de acuerdo a los porcentajes descritos en la Figura 3-16.

**Figura 3-18:** Asignaciones de viajes con las matrices filtradas por corredor de origen.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para dibujar las rutas radiales sobre el mapa se ha utilizado el enfoque del camino más rápido, en concordancia con la función objetivo definida al principio de este capítulo, en la cual es primordial minimizar los tiempos de viaje de los usuarios. Los

trazados geográficos obtenidos al seguir el proceso heurístico propuesto serán mostrados en la subsección 3.4.3.

### **Asignación de puntos de parada para rutas radiales con enfoque simple:**

Después de haber definido los trazados geográficos, se procede a asignar las estaciones de parada en las rutas de cada corredor, tal como se estructuró en el flujograma de alto nivel de la Figura 3-15.

Para este efecto, la Figura 3-19 muestra la heurística propuesta para la asignación de puntos de parada para rutas radiales con enfoque de diseño simple sobre un corredor. Esta heurística, en cada uno de sus pasos, parte de un análisis de la demanda de viajes en el corredor. En primer lugar, es necesario decir que bajo este enfoque, todas las rutas deben detenerse en sus respectivos portales y en las estaciones intermedias -que posean componente de alimentación- del corredor troncal. Esto se justifica teniendo en cuenta que estos sitios son los que más viajes generan, y dado que la cantidad de rutas por corredor es limitada -diseño simple-, se precisa que allí la oferta de rutas sea lo más variada y amplia posible. En segundo lugar, tal como su nombre indica, la ruta radial paradora del corredor deberá detenerse en todas las estaciones a su paso.

A continuación, tomando solamente los viajes generados en el corredor de origen, se procede a clasificar a las estaciones de este corredor según las siguientes definiciones:

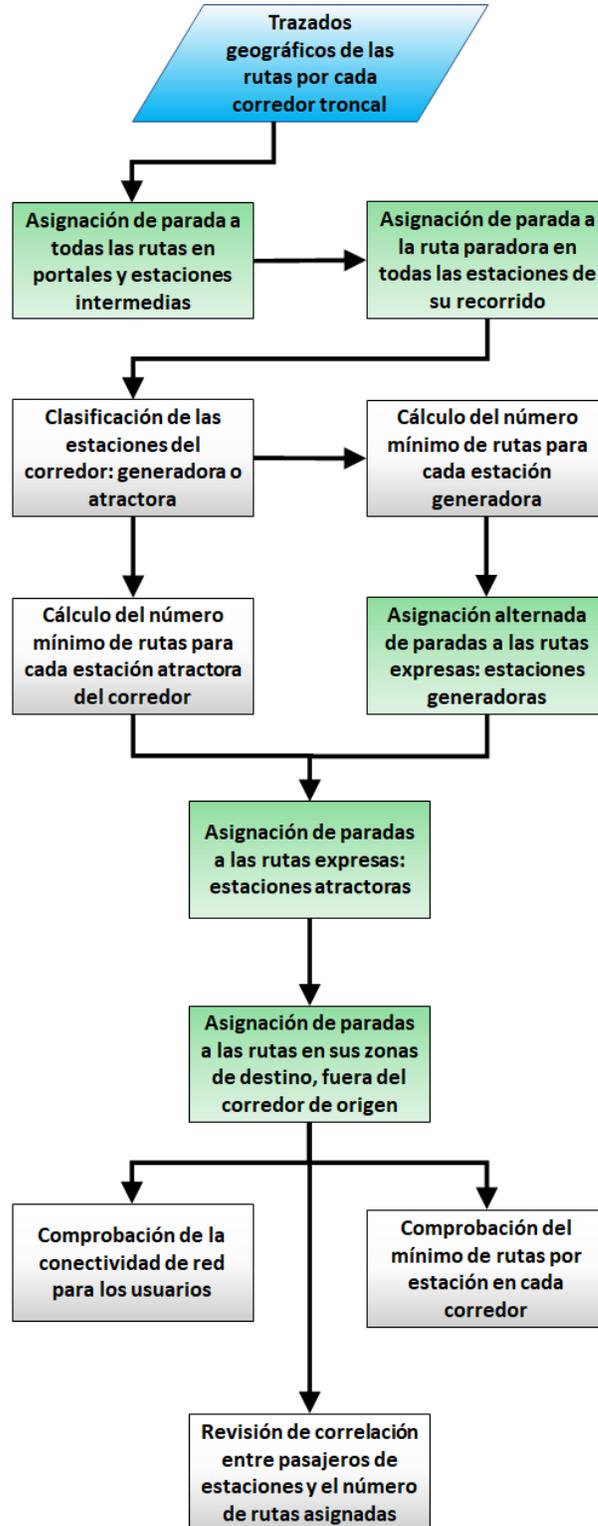
$$\text{Si } Val_{est\ i} \geq Sal_{est\ i} \rightarrow \text{La estación } i \text{ es generadora} \quad (3.13)$$

$$\text{Si } Val_{est\ i} < Sal_{est\ i} \rightarrow \text{La estación } i \text{ es atractora} \quad (3.14)$$

Donde:

- $Val_{est\ i}$  corresponde a las validaciones de la estación  $i$ .
- $Sal_{est\ i}$  corresponde a las salidas de la estación  $i$ .

**Figura 3-19:** Diagrama de flujo de la heurística para la asignación de puntos de parada en rutas radiales con enfoque de diseño simple.



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, se define:

$$NR_{max\ corredor\ i} \geq NR_{min\ est\ gen\ i} \geq \text{Redondear.mas} \left[ \frac{Val_{est\ i}}{(Cap_{min} \times F_{max})} \right] + 1 \quad (3.15)$$

$$NR_{max\ corredor\ i} \geq NR_{min\ est\ atr\ i} \geq \text{Redondear.mas} \left[ \frac{Sal_{est\ i} \times 2}{(Cap_{min} \times F_{max})} \right] + 1 \quad (3.16)$$

Donde:

- $NR_{max\ corredor\ i}$  corresponde al número máximo de rutas en el corredor de la estación i.
- $NR_{min\ est\ gen\ i}$  corresponde al número mínimo de rutas que deben parar en la estación generadora i.
- $NR_{min\ est\ atr\ i}$  corresponde al número mínimo de rutas que deben parar en la estación atractora i.
- $Cap_{min}$  corresponde a la capacidad mínima de las unidades de transporte, 160 pasajeros para buses articulados.
- $F_{max}$  corresponde a la frecuencia máxima ideal de diseño por ruta, tomándose un valor de 24 buses por hora para este caso.

Con la aplicación de las ecuaciones (3.15) -para estaciones generadoras- y (3.16) -para estaciones atractoras- se busca garantizar que, bajo el diseño con enfoque simple, cada estación tenga un número mínimo de rutas que garanticen una correcta cobertura de la demanda sin requerir frecuencias excesivamente altas en algunas rutas. En la práctica, después de haber realizado el ejercicio completo, se tienen los siguientes números por tipo de estación:

- Para portales y estaciones intermedias, 4 o 5 rutas.
- Para estaciones de gran demanda, típicamente con tres vagones, 3 rutas.
- Para el resto de las estaciones, 2 rutas.

Las ecuaciones presentadas aseguran que para cada estación del corredor de origen se asignen mínimo dos rutas: la ruta paradora y al menos una ruta expresa.

- Después de haber definido si cada estación es generadora o atractora, y el número mínimo de rutas que deben parar en cada una, se procede a asignar las rutas que paran en cada estación. Se empieza por las estaciones generadoras del corredor de origen -se toma como ejemplo la troncal Américas-:
- Las paradas comienzan a asignarse desde la estación más periférica, hacia el centro ampliado -desde el Portal Américas hacia el oriente-.
- Al momento de asignar las rutas que paran en las estaciones generadoras, alternar entre las rutas que tienen como destino zonas distintas, en este orden:
  - Ruta expresa hacia Museo Nacional, si la hay, y solo si esta para en el portal respectivo y si cubre una porción significativa del corredor troncal en análisis -i.e. la actual ruta M83 no se tendría en cuenta para el caso del corredor Av. Caracas Sur porque sale muy tempranamente de este tramo de la troncal. Tampoco las actuales M81 ni M84 porque no paran en los portales de su corredor-. -En el ejemplo sí aplica porque se ha contemplado una ruta hasta Museo Nacional, con el mismo trazado que la actual ruta M51-.
  - Ruta expresa hacia el corredor contrario a la ruta paradora. -Para la troncal Américas, la ruta paradora se ha diseñado con destino en la zona Caracas Central, el corredor contrario entonces es la Av. NQS-
  - Ruta expresa hacia la zona distinta del destino final de la ruta paradora, pero en su mismo corredor. -En el ejemplo, corresponde a la ruta hacia la zona Héroes-
  - Ruta expresa similar a la paradora. -En el ejemplo, corresponde a la ruta expresa hacia la zona Av. Caracas Central-.
- Asignar paradas según la alternancia descrita en el punto anterior, hasta completar todas las estaciones generadoras del corredor.

El siguiente grupo de estaciones son las atractoras del mismo corredor de origen:

- Teniendo en cuenta que la ruta expresa más corta se diseña para cubrir viajes dentro de su propio corredor troncal, esta ruta debe tener prelación al momento de asignar paradas en las estaciones atractoras del mismo corredor. En primer lugar, se le asignará parada en la última estación atractora que disponga de retorno operacional dentro de su propio corredor. En esta estación podrán hacer transferencia personas provenientes de otros puntos. En segundo lugar, se asignará parada en las siguientes dos estaciones atractoras más cargadas del corredor, que pertenezcan al trazado de la ruta. *-En el ejemplo, la ruta expresa corta corresponde a la que se dirige hacia Av. Caracas Central-*.
- A continuación, se asignan las paradas de la ruta expresa del corredor de la zona de destino menos cargada (entre Av. NQS y Av. Caracas). Esta ruta debe detenerse en la estación atractora de su mismo corredor con más salidas registradas en los torniquetes, y en las siguientes dos estaciones (si las hay) con más salidas que no hayan sido cubiertas por la ruta anterior, y pertenezcan a su trazado. Es imperativo evitar que una ruta tenga tres paradas consecutivas en las estaciones atractoras del corredor de origen durante este punto del proceso. Además, se debe propender por que haya una parada de esta ruta al final del tramo antes de abandonar el corredor troncal original. *-Retomando el ejemplo, la ruta expresa del corredor de destino menos cargado corresponde a la que se dirige hacia la Av. NQS-*.
- Al comprobar si aún quedan estaciones atractoras que no tengan asignado el mínimo de rutas requeridas, se debe asignar a cada estación de estas, de haberlas, una ruta en este orden: ruta del corredor menos cargado, ruta expresa más corta, y así sucesivamente hasta completar todas las estaciones atractoras del corredor. En cualquier caso, se debe evitar asignar paradas en una misma ruta en tres estaciones atractoras consecutivas. Durante el presente ejercicio, la comprobación de esto último se ha realizado de forma manual.
- En general, no se contempla que la ruta expresa más larga del corredor más cargado *-la ruta hacia Héroes en el ejemplo-* se detenga en las estaciones atractoras de su mismo corredor troncal, esto porque esta ruta se diseña para atender otra zona de destino fuera de su corredor de origen. Sin embargo, de ser absolutamente necesario se podría asignar una parada en una estación atractora del mismo corredor, siempre que esta estación no sea un polo de atracción importante dentro de la red troncal.

- El último grupo de estaciones son aquellas localizadas en los corredores de destino de las distintas rutas:
- Asignación de paradas a la ruta expresa más corta, fuera de su corredor de origen: En primer lugar, esta ruta debe parar en la estación más cercana a su punto de retorno operacional. Adicionalmente, parará de forma intercalada en las estaciones de la zona de destino, deteniéndose obligatoriamente en la estación con más salidas de ese tramo.
- Asignación de paradas a la ruta expresa más larga, fuera de su corredor de origen: esta ruta debe parar en la primera estación de su zona de destino que tenga retorno operacional. Si al inicio del tramo de destino ninguna estación tiene retorno, parará en la primera o segunda estación de este tramo -intercalando esta elección con las rutas provenientes de otros corredores troncales para no sobrecargar una sola estación-. También parará en la estación más cercana al retorno operacional que utilizará el bus para devolverse, y deberá parar en la estación con más salidas -según registros de los torniquetes- de su zona de destino. En el resto de las estaciones de la zona de destino se asignarán paradas de forma intercalada, si para en una estación, no parará en la siguiente.
- Asignación de paradas a la ruta expresa del corredor de destino menos cargado, fuera de su corredor de origen: se aplica exactamente el mismo procedimiento del punto anterior, garantizando una parada de intercambio con las rutas que vienen de otros corredores troncales, tanto al inicio de la zona de destino como al final.

Se reitera que durante todo el procedimiento de asignación de paradas solo se contemplan los viajes originados en el corredor de origen que esté siendo analizado. Dicho de otra forma, si se están asignando paradas a las rutas de la troncal Américas, solo se tendrán en cuenta los viajes que se generen en este corredor para la cuantificación de validaciones y salidas en todas las estaciones de la red, según los resultados de la simulaciones mostradas en la Figura 3-18.

Una vez asignadas las estaciones de parada a las rutas de todos los corredores, es necesario verificar la congruencia de la solución de red obtenida mediante el proceso heurístico. Tal como se dijo antes, con el proceso que se acaba de describir no se pretende obtener una solución optimizada de los trazados geográficos ni de la asignación de paradas. Lo que si se desea implementar es una red funcional de rutas, que cumpla

con unos estándares mínimos de conectividad, número mínimo de rutas por estación, y correlación entre pasajeros y cantidad de rutas atendiendo un punto.

La primera revisión que se efectúa es la de la conectividad de las rutas radiales diseñadas. Para ello se debe comprobar que los usuarios provenientes de cada corredor de origen tengan a su disposición al menos un servicio, con al menos una parada -en el centro ampliado- en la que se pueda hacer conexión hacia los demás corredores de la troncal. Esto significa, por ejemplo, que los usuarios provenientes del Portal Américas puedan hacer un transbordo en el centro ampliado para tomar un servicio que los lleve por la Autonorte, la Calle 26, la Calle 80, etc. Al hacer esta comprobación se evidencia que no existe un par de rutas que permita conectar la troncal Américas y la Cr. 10, mediante un solo transbordo en el centro ampliado. Por lo tanto, se crea una ruta nueva para conectar estos dos corredores, Portal Américas – Museo Nacional, y se repite el proceso de asignación de paradas para las rutas de la troncal Américas.

Adicionalmente, se ha simulado una asignación de viajes en el modelo de transporte, utilizando las rutas radiales diseñadas. Allí se ha verificado positivamente que existe conexión entre todas las estaciones de la troncal, dado que todos los viajes se han asignado exitosamente.

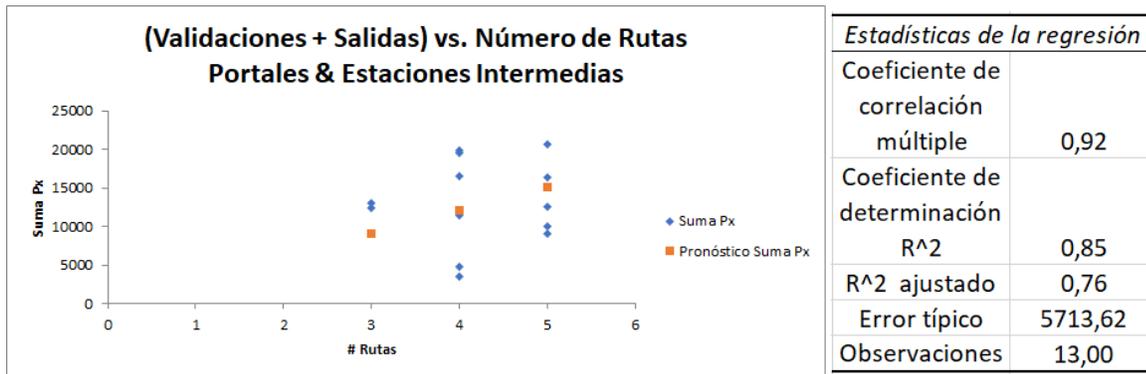
La segunda fase de la revisión consiste en verificar que todas las estaciones tengan asignado el número mínimo de rutas según las ecuaciones (3.15) y (3.16). Se detecta que en la estación Castellana solo pararía una ruta. Sin embargo, por la estructura de la red troncal en este punto, no es posible asignar más que la ruta que conecta la Autonorte con la Av. NQS. Por lo tanto, se permitirá una excepción para esta estación, en el caso de rutas radiales con enfoque de diseño simple.

En la tercera fase de revisión se procede a realizar una regresión lineal entre el número de rutas asignadas y la suma de las validaciones y las salidas de cada estación. El objetivo de esta regresión es verificar que las estaciones más cargadas efectivamente tengan más rutas asignadas. Si bien, el verdadero ítem a examinar en este caso sería el número de buses por hora en cada estación, esta comprobación preliminar -antes de ejecutar el proceso de asignación de viajes- ayudará a revisar que no queden estaciones de alta demanda atendidas por pocas rutas, y por ende, que en estas rutas no sean

inyectados de manera intempestiva grandes volúmenes de demanda. La idea es minimizar la posibilidad de que los servicios en cuestión tengan perfiles de carga con picos abultados, y así no aumentar ineficientemente la flota requerida.

Para llevar a cabo la correlación descrita, las estaciones se segmentarán en tres grupos: portales y estaciones intermedias, estaciones de los corredores de origen, y estaciones de los corredores de destino -centro ampliado-.

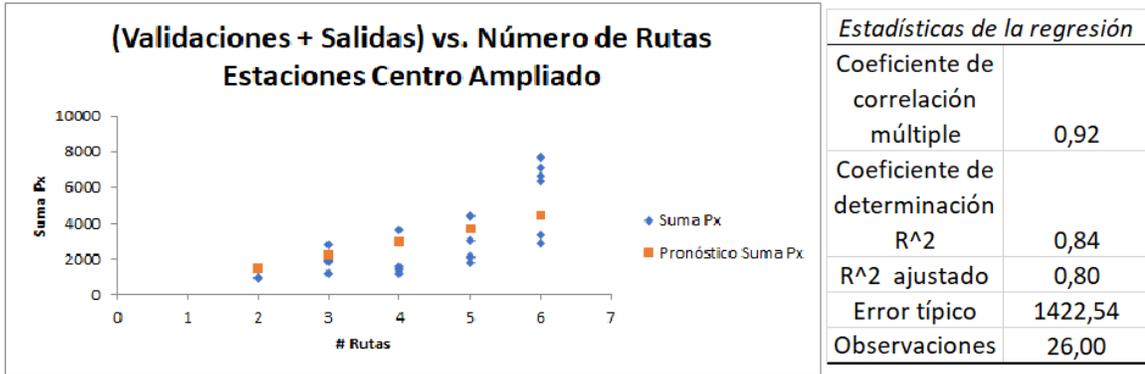
**Figura 3-20:** Regresión para portales y estaciones intermedias



Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la regresión para portales y estaciones intermedias -Figura 3-20-, se ha detectado que en la estación de San Mateo y el Portal del Tunal no hay suficientes rutas para atender la demanda allí presente. Por lo tanto, se procede a crear una ruta adicional en cada uno de estos nodos del sistema, para darles conexión directa con zonas del centro ampliado: San Mateo - Flores, Portal Tunal - Calle 19. Por otro lado, existen tres estaciones con un número significativo de rutas, a pesar de su bajo número de validaciones y salidas: Bicentenario, Calle 40 Sur y Av. 1 Mayo. Las tres son estaciones intermedias que reciben rutas alimentadoras y que además, funcionan como estaciones de transbordo. Teniendo en cuenta esto, se decide dejar tal cual sus rutas asignadas, pero no serán tenidas en cuenta en la regresión para no alterar el nivel de correlación de la muestra.

**Figura 3-21:** Regresión para estaciones del centro ampliado



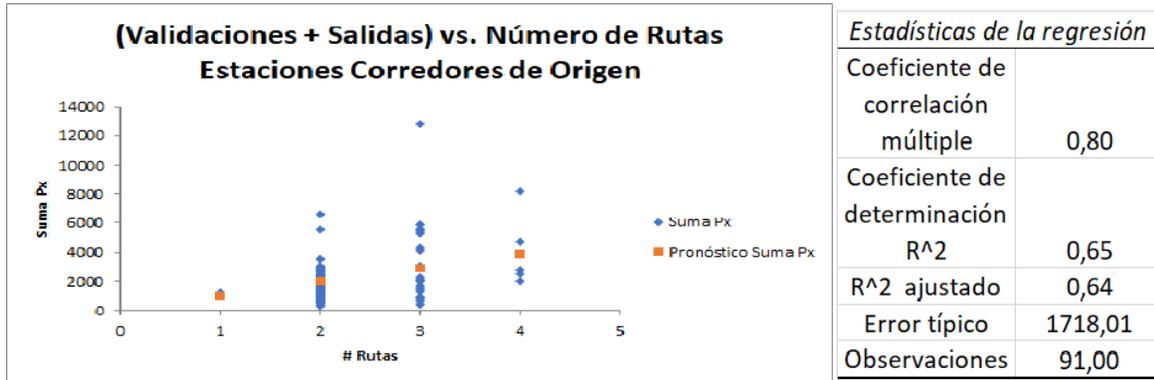
Fuente: Elaboración propia.

Mientras tanto, en la regresión para estaciones del centro ampliado -Figura 3-21- se ha detectado que las estaciones Movistar Arena y Universidad Nacional tienen muchas rutas asignadas con relación a su demanda. Por lo tanto, se procede a eliminar las paradas de las rutas provenientes de los tres corredores de origen que menos pasajeros aportan a estas estaciones. También se ha notado que las estaciones Av. Chile y Calle 75 tienen asignadas más rutas que las convenientes, así que con el fin de evitar que muchos buses se detengan en el mismo sitio, se eliminarán algunas de las paradas de las rutas provenientes de los corredores troncales del sur de la ciudad. De este modo, unas rutas solo pararán en Av. Chile y otras solo en Calle 75. Las rutas provenientes de los corredores del norte de la ciudad mantendrán su parada en ambas estaciones para facilitar el transbordo de los usuarios que tengan como destino los corredores Autonorte, Av. Suba y Calle 80. De otra parte, a las estaciones Calle 63, Calle 57, Calle 39 y Calle 26 se les adicionará una ruta para evitar sobrecargar los servicios allí asignados.

Finalmente, al realizar la regresión para las estaciones de los diferentes corredores de origen -Figura 3-22-, es posible darse cuenta de que no se obtiene un patrón de relación muy claro entre la cantidad de pasajeros que usan una estación y el número de rutas que allí se detienen. Esto no es extraño teniendo en cuenta que cada corredor de origen tiene sus propios patrones de demanda y características geométricas intrínsecas. Por ejemplo, en el corredor de la Autonorte, existen tres estaciones con alta demanda que, por la propia geometría del corredor y la filosofía de diseño simplificado, solo pueden tener dos o tres rutas asignadas: Calle 100, Virrey y Calle 85. Lo anterior se da porque las rutas

que provienen del sur deben retornar en la estación de Héroes, evidenciándose que podrían hacer falta otros puntos de retorno en las estaciones mencionadas. Por otro lado, a las estaciones Toberín, Calle 146, Calle 127, Pepe Sierra y Calle 106, se les adiciona una ruta para ajustarse mejor a la demanda en estos puntos.

**Figura 3-22:** Regresión para estaciones de los corredores de origen



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente capítulo, cuando se realice la simulación de los diferentes escenarios, se revisará el número de buses deteniéndose en cada estación y se comparará con la demanda y la capacidad operacional de cada parada.

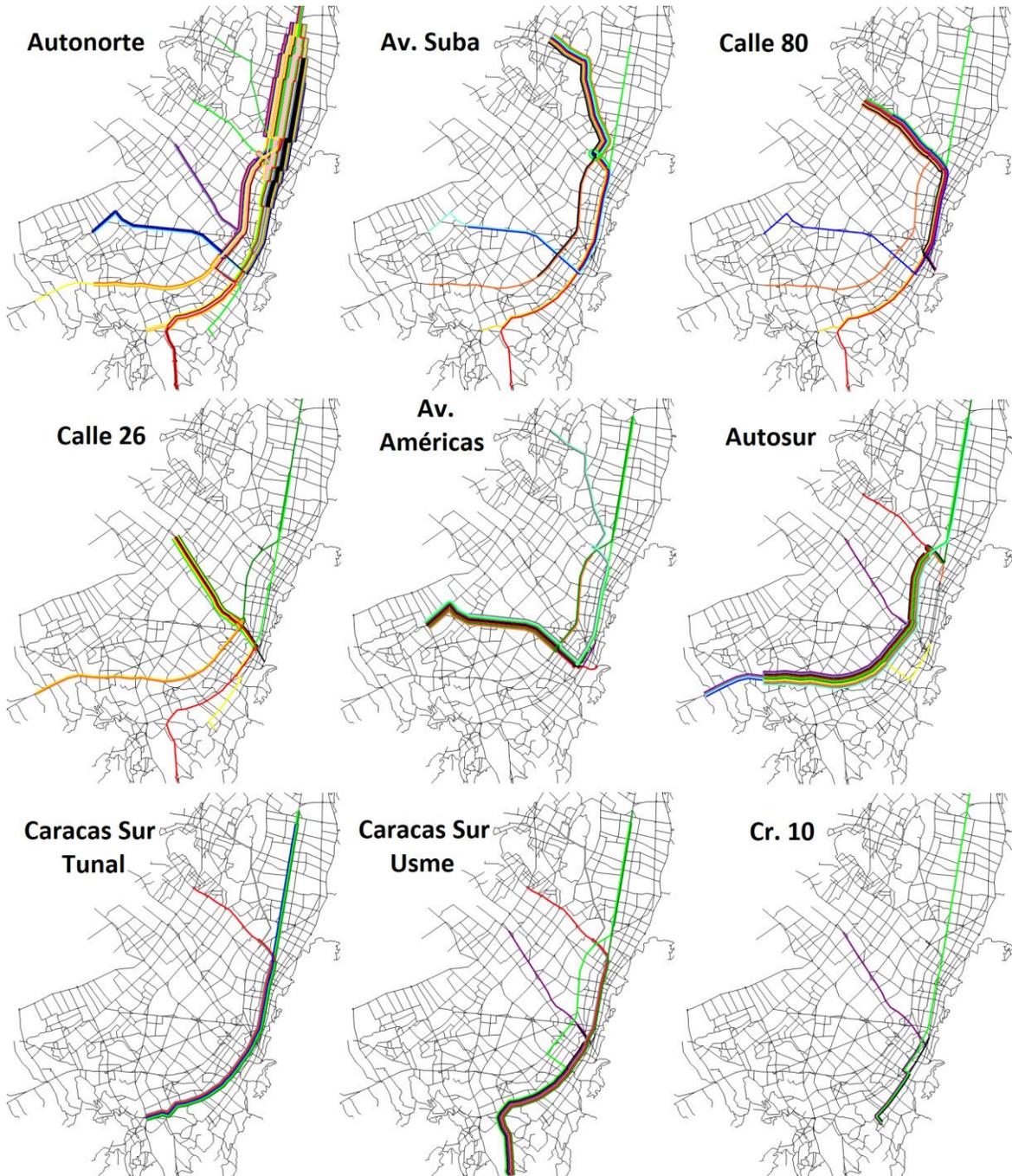
### 3.4.2 Escenario 0: red de rutas 2020

Como en cualquier proceso de modelación, es necesario empezar con un escenario que brinde una línea base para la evaluación del estado actual de las cosas y la calibración del modelo de transporte. Así que el punto de partida estará dado por el escenario con la red real de rutas a febrero de 2020. Los datos han sido tomados del buscador de rutas [85] de la página oficial de TransMilenio S.A.

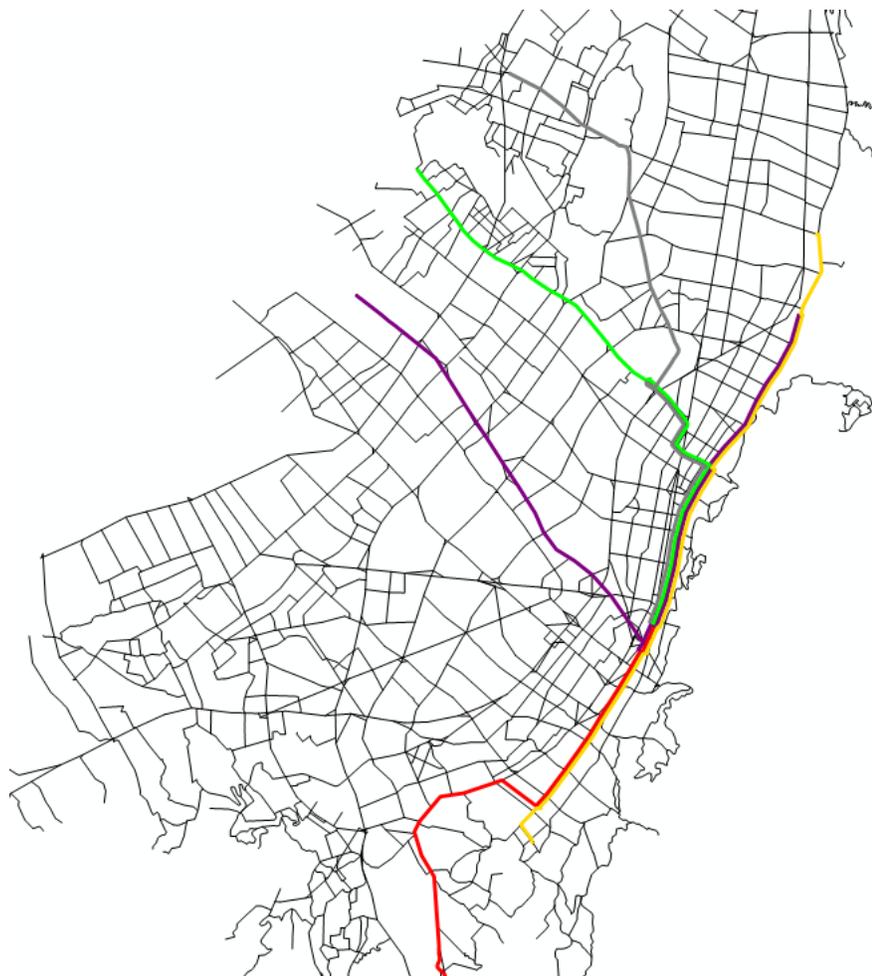
La Figura 3-23 permite ver la implementación en PTV-Visum de la red de rutas troncales activas a febrero de 2020. Tal como se mencionó en la sección 2.3, en el diseño actual de rutas priman los servicios diametrales de portal a portal, que interconectan entre sí diferentes troncales, y en donde se utiliza frecuentemente el diseño multicriterio para planificar rutas de distintos tipos. De todas formas, en la figura puede observarse que

existen algunas rutas radiales y que algunos corredores troncales tienen una red de rutas más compleja que la de otros.

**Figura 3-23:** Red de rutas troncales de TransMilenio a febrero de 2020



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Figura 3-24:** Red de rutas duales de TransMilenio a febrero de 2020

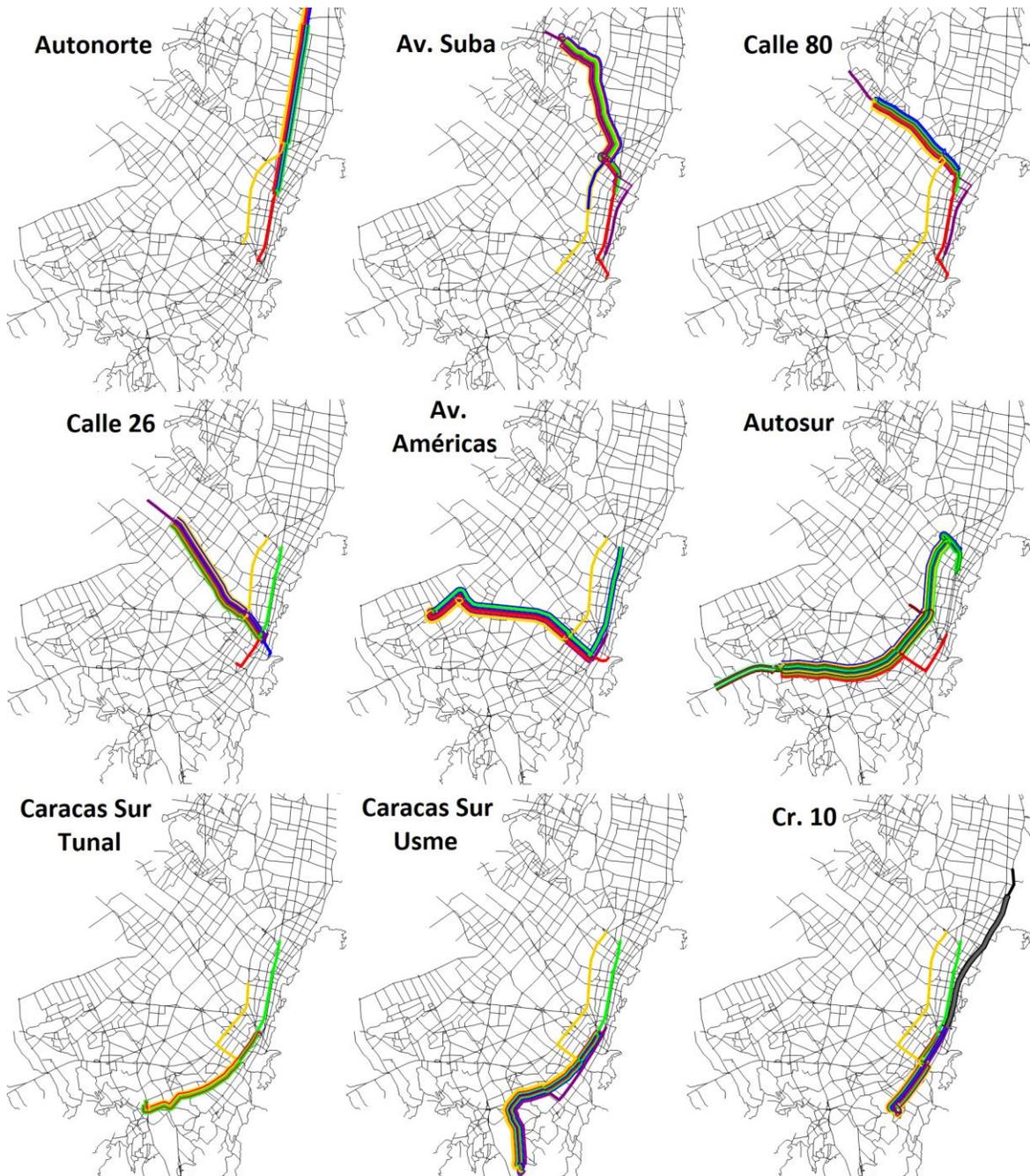
Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Adicionalmente, la Figura 3-24 muestra las cinco rutas que operan con buses duales. Estas rutas transitan tanto por corredores troncales como no troncales, tienen como punto en común la Estación Museo Nacional -la cual funciona como una estación central de intercambio- y conectan diferentes corredores troncales con la Cr. 7 que, pese a ser una de las vías más importantes de la ciudad, no dispone de una troncal de TransMilenio o de otro modo de transporte masivo. Como puede verse, en los servicios duales predominan las rutas radiales, gracias a la existencia de la estación central de intercambio.

### 3.4.3 Escenario 1: rutas radiales con enfoque de diseño simple

La Figura 3-25 muestra la red de rutas diseñada en la subsección 3.4.1.

**Figura 3-25:** Red de rutas radiales con enfoque de diseño simple



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

### **3.4.4 Escenario 2: rutas diametrales con enfoque de diseño simple**

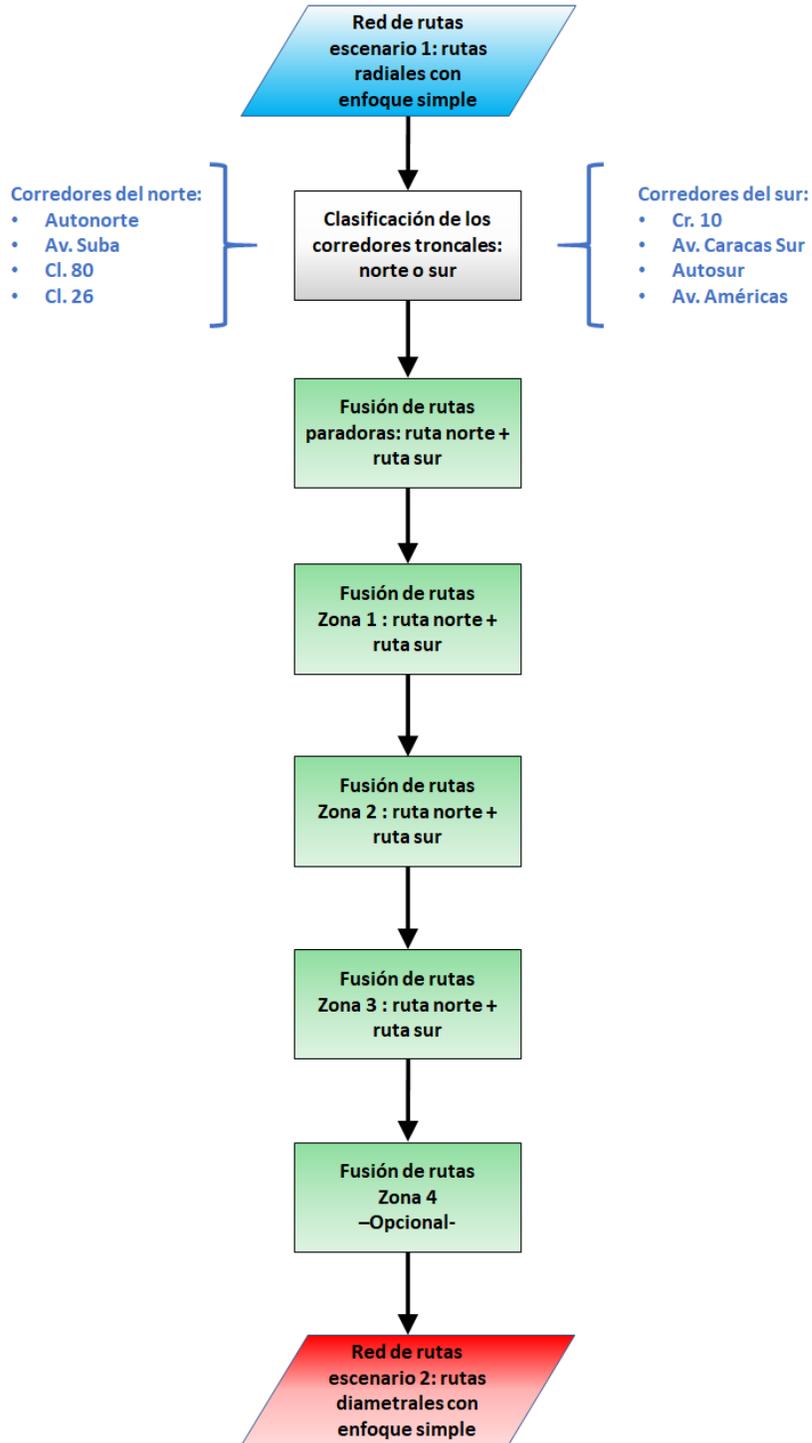
Las rutas de este escenario fueron generadas mediante la fusión de las rutas radiales simples del escenario 1, conservando iguales las paradas de cada segmento original. El proceso heurístico definido para esto es muy sencillo -Figura 3-26-. Básicamente se trata de fusionar una ruta proveniente del norte con otra proveniente del sur. Una vez que dos rutas radiales se fusionan, no vuelven a ser usadas para otra fusión que genere una nueva ruta diametral. Además, se busca fusionar dos rutas del mismo tipo: rutas paradoras se fusionan con otras rutas paradoras, rutas radiales cuyo destino sea la zona 1 se fusionan con rutas que también terminen en la zona 1, continuando así para las demás zonas de destino.

La posible excepción a lo anterior son las rutas que terminan en la zona 4: Museo Nacional, debido a que el corredor troncal de la Cr. 7 aún no existe. Por lo tanto, es posible que no se pueda encontrar una ruta radial del norte con la cual fusionar cada ruta proveniente del sur en la troncal de la Cr. 10. Específicamente, la ruta paradora del tramo “Portal 20 Julio - Museo Nacional” seguirá teniendo una configuración radial, al no disponer de un corredor troncal por el cual continuar hacia el norte. Lo mismo aplica para la ruta expresa “Portal Américas – Museo Nacional”. El resultado del proceso aplicado puede observarse en la red de rutas diametrales mostrada en la Figura 3-27.

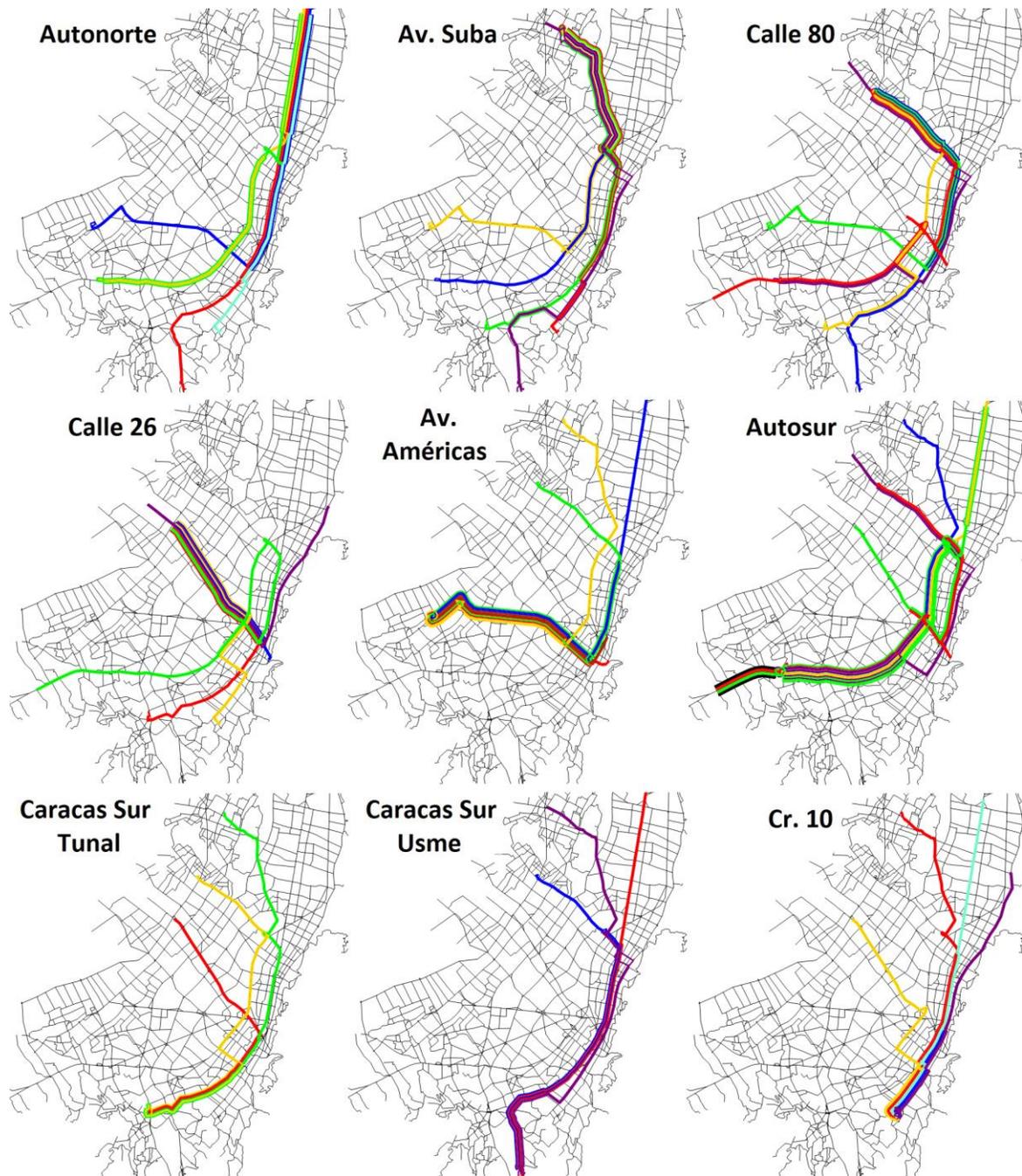
Por otra parte, es importante mencionar que debido a que estas rutas diametrales se generan directamente de la fusión de rutas radiales con enfoque de diseño simple, y a que estas últimas ya han pasado las comprobaciones descritas en la subsección 3.4.1, no se ha considerado necesario realizar nuevas comprobaciones a las rutas del escenario 2, relativas a conectividad, número mínimo de rutas por estación o correlación entre pasajeros y rutas asignadas en una estación.

Finalmente, la Tabla 3-1 -la cual se puede encontrar al final de esta subsección- muestra las combinaciones que se han establecido al fusionar rutas de los corredores del norte y sur. La filosofía utilizada es que cada corredor del sur tenga una ruta directa que conecte con algunos -no necesariamente todos- corredores del norte. Esto sin superar el número máximo de rutas por corredor troncal en el enfoque de diseño simple: una ruta paradora y hasta 4 rutas expresas.

**Figura 3-26:** Proceso heurístico para la generación de la red de rutas del escenario 2



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-27:** Red de rutas diametrales con enfoque de diseño simple

Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Tabla 3-1:** Combinaciones de rutas fusionadas para el escenario 2

<b>Corredor Norte/Sur</b>	<b>Autonorte</b>	<b>Av. Suba</b>	<b>Cl. 80</b>	<b>Cl. 26</b>	<b>Radiales</b>
<b>Av. Américas</b>	Paradora	Zona 3	Zona 2		Zona 1-Zona 4
<b>Autosur</b>	Zona 2-Zona 3	Paradora	Zona 4		
<b>Autosur Soacha</b>			Zona 1	Zona 2	
<b>Av. Caracas Sur Tunal</b>		Zona 2	Zona 3	Zona 1	
<b>Av. Caracas Sur Usme</b>	Zona 1-Zona 2	Zona 4	Paradora		
<b>Cr. 10</b>	Zona 2	Zona 1		Zona 3	Paradora
<b>Radiales</b>				Paradora	

### 3.4.5 Escenario 3: rutas radiales con enfoque de diseño multicriterio

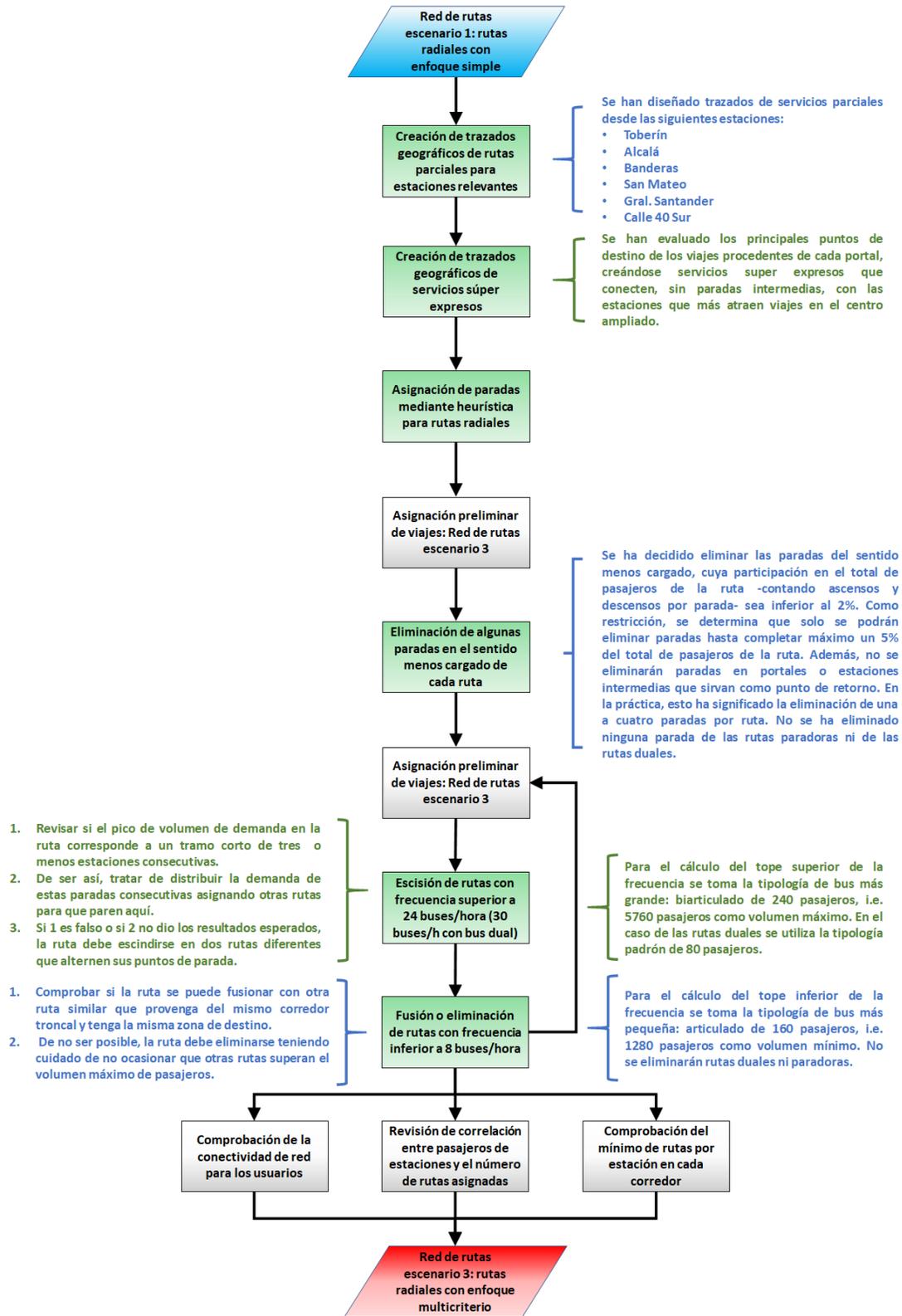
La Figura 3-28 describe el proceso heurístico que se ha seguido para el diseño de las rutas del escenario 3. Básicamente, la idea es generar estas nuevas rutas partiendo del escenario 1 de rutas radiales con diseño simple, y adicionando rutas parciales desde estaciones intermedias y servicios superexpresos desde los portales a las estaciones de destino con mayor atracción de viajes.

Paso seguido, se realiza la asignación de paradas a la nueva red de rutas mediante el proceso heurístico que se muestra en la Figura 3-29 y se ejecuta una asignación preliminar de viajes que permita obtener información para suprimir algunas paradas de las nuevas rutas en su sentido menos cargado, generando así servicios asimétricos en sus sentidos de ida y vuelta.

A continuación, se realiza una nueva asignación de viajes que permita determinar el volumen máximo de pasajeros que se espera tenga cada ruta, para así proceder a escindir rutas que requieran frecuencias más altas que cierto valor -determinado durante las entrevistas a los expertos-, y a fusionar o eliminar servicios con baja demanda cuya frecuencia modelada sea inferior a lo establecido en el Estándar BRT 2016 [73]. Se debe iterar hasta que todas las rutas respeten los límites de frecuencia establecidos.

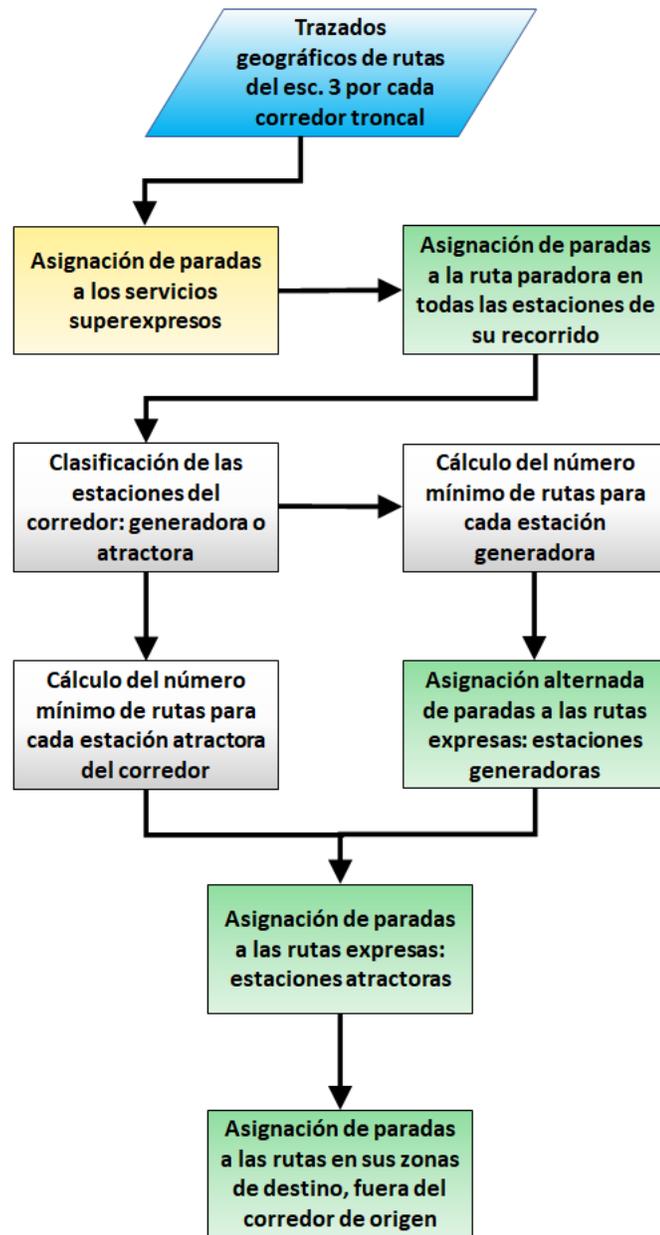
Como paso final, se realizan las comprobaciones de conectividad, número mínimo de rutas por estación, y correlación entre pasajeros y el número de rutas por estación.

Figura 3-28: Proceso heurístico para la generación de la red de rutas del escenario 3



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-29:** Diagrama de flujo de la heurística para la asignación de puntos de parada en rutas radiales con enfoque de diseño multicriterio



Fuente: Elaboración propia.

El proceso heurístico para la asignación de los puntos de parada -Figura 3-29- comienza a ejecutarse una vez se tienen los trazados geográficos de las rutas del escenario 3. Inicialmente, se asignan paradas a los servicios superexpresos que se originan únicamente en los portales y que conectan con las dos o tres estaciones más cargadas

de cada zona de destino, según lo deducido de las matrices de viajes filtradas por corredor troncal. A continuación, se asignan las paradas a las rutas paradoras que se han diseñado en este escenario. Además, se clasifican las estaciones de cada corredor troncal de origen como generadoras o atractoras de viajes, siguiendo exactamente los mismos criterios utilizados en la subsección 3.4.1.

De forma similar a lo explicado en dicha subsección, se determina el mínimo número de rutas en cada estación del corredor troncal. Sin embargo, las ecuaciones (3.15) y (3.16), utilizadas antes, van a tener un ligero cambio para reflejar que al haber un mayor número de rutas en un diseño multicriterio, a cada estación le deben corresponder más servicios que en un diseño con enfoque simple. Las nuevas ecuaciones quedan de la siguiente forma:

$$NR_{max\ corredor\ i} \geq NR_{min\ est\ gen\ i} \geq \text{Redondear.mas} \left[ \frac{Val_{est\ i}}{(Cap_{min} \times F_{max})} \right] * 2 + 1 \quad (3.17)$$

$$NR_{max\ corredor\ i} \geq NR_{min\ est\ atr\ i} \geq \text{Redondear.mas} \left[ \frac{Sal_{est\ i} \times 2}{(Cap_{min} \times F_{max})} \right] * 2 + 1 \quad (3.18)$$

Donde:

- $NR_{max\ corredor\ i}$  corresponde al número máximo de rutas en el corredor de la estación i.
- $NR_{min\ est\ gen\ i}$  corresponde al número mínimo de rutas que deben parar en la estación generadora i.
- $NR_{min\ est\ atr\ i}$  corresponde al número mínimo de rutas que deben parar en la estación atractora i.
- $Cap_{min}$  corresponde a la capacidad mínima de las unidades de transporte, 160 pasajeros para buses articulados.
- $F_{max}$  corresponde a la frecuencia máxima ideal de diseño por ruta, tomándose un valor de 24 buses por hora para este caso.

El resto del proceso de asignación de paradas es muy similar al utilizado para las rutas del escenario 1. Solamente se considerarán algunas ligeras divergencias en la metodología, teniendo en cuenta que hay que acomodarse a ciertos efectos derivados del uso de lineamientos multicriterio. Por ejemplo, al momento de asignar paradas en las estaciones generadoras de viajes de cada corredor troncal, deben considerarse estas diferencias:

- No se asignan paradas en estaciones generadoras del mismo corredor troncal cubiertas por otro grupo de rutas parciales provenientes de una estación intermedia. Dicho de otra forma, cada sección generadora se trata como si fuera independiente. -En el escenario 1 solo existía una sección generadora por corredor troncal, el escenario 3 puede contemplar diferentes secciones de este tipo en el mismo corredor, gracias a las rutas parciales-
- Para la cuenta total de paradas por estación se tienen en cuenta tanto la ruta paradora como los superexpresos. -En el escenario 1 no hay servicios superexpresos-
- En la principal estación intermedia o portal de cada segmento troncal solo se requiere que paren las rutas parciales de su respectivo grupo. -En el escenario 1 todas las rutas debían parar en todos los portales y estaciones intermedias de su corredor-

En cuanto a la asignación de paradas en las estaciones atractoras del mismo corredor troncal, las diferencias consisten en:

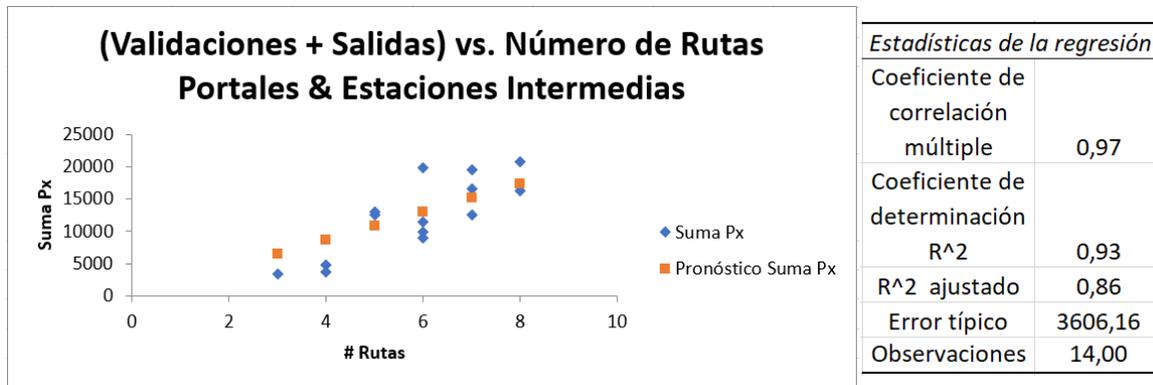
- Se debe garantizar que desde cada zona del corredor troncal exista al menos una ruta, diferente a la paradora, que comunique con las diferentes estaciones atractoras del mismo corredor. -Esto no era obligatorio en el escenario 1, delegando esta labor únicamente en la ruta paradora-
- Adicionalmente, si no hay suficientes rutas para garantizar el número mínimo requerido en cada estación atractora, será posible asignar a uno o varios servicios superexpresos una parada en una de estas estaciones, con la condición de que sean las estaciones atractoras menos cargadas, y así evitar grandes picos en el perfil de carga de este tipo de rutas. -En el escenario 1 no hay servicios superexpresos-

Por último, en la asignación de paradas en las zonas de destino, i.e. en el centro ampliado, no existen diferencias respecto al proceso usado en el escenario 1.

Después de haber asignado las paradas y haber ejecutado el proceso iterativo -descrito en la Figura 3-28- para la escisión, fusión o eliminación de rutas según su volumen de pasajeros, se han realizado las comprobaciones correspondientes. En primer lugar, se ha verificado la conectividad de la red mediante la ejecución de una asignación de viajes que ha demostrado que todos los pares O-D están conectados. En segundo lugar, se ha verificado que todas las estaciones de cada corredor troncal de origen tengan, al menos, el número mínimo de rutas establecido por las ecuaciones (3.17) y (3.18).

Finalmente, se ha revisado la correlación entre pasajeros y rutas asignadas a cada estación, repitiéndose la segmentación utilizada en la subsección 3.4.1: portales y estaciones intermedias, estaciones de los corredores de origen, y estaciones de los corredores de destino -centro ampliado-.

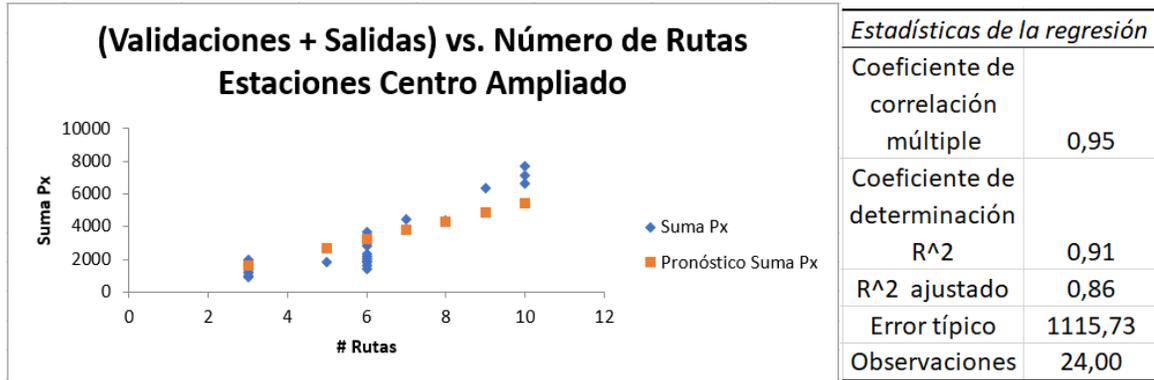
**Figura 3-30:** Regresión para portales y estaciones intermedias



Fuente: Elaboración propia.

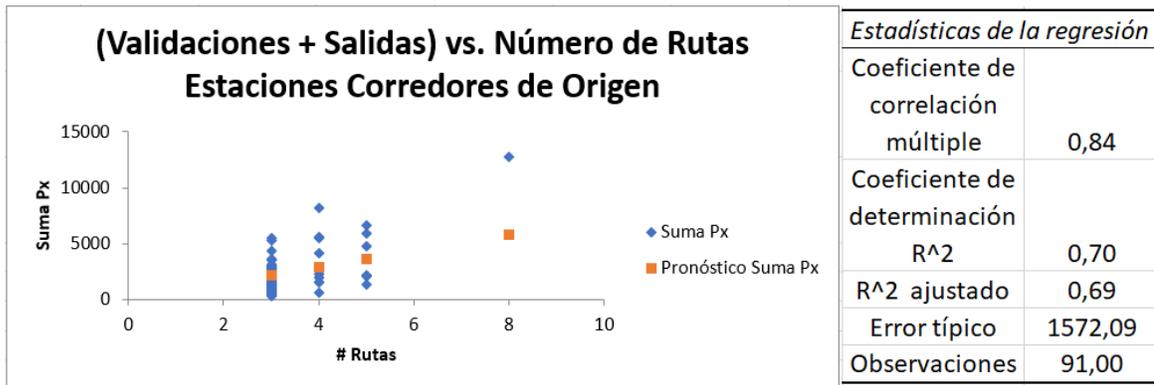
Al realizar la regresión para portales y estaciones intermedias -Figura 3-30-, se ha obtenido un grado de correlación mejor que en el caso de las rutas del escenario 1. Además, no ha sido necesario hacer cambios manuales en las paradas asignadas. Nuevamente, se dejan por fuera de la muestra las estaciones de intercambio Bicentenario, Calle 40 Sur y Av. 1 Mayo.

**Figura 3-31:** Regresión para estaciones del centro ampliado



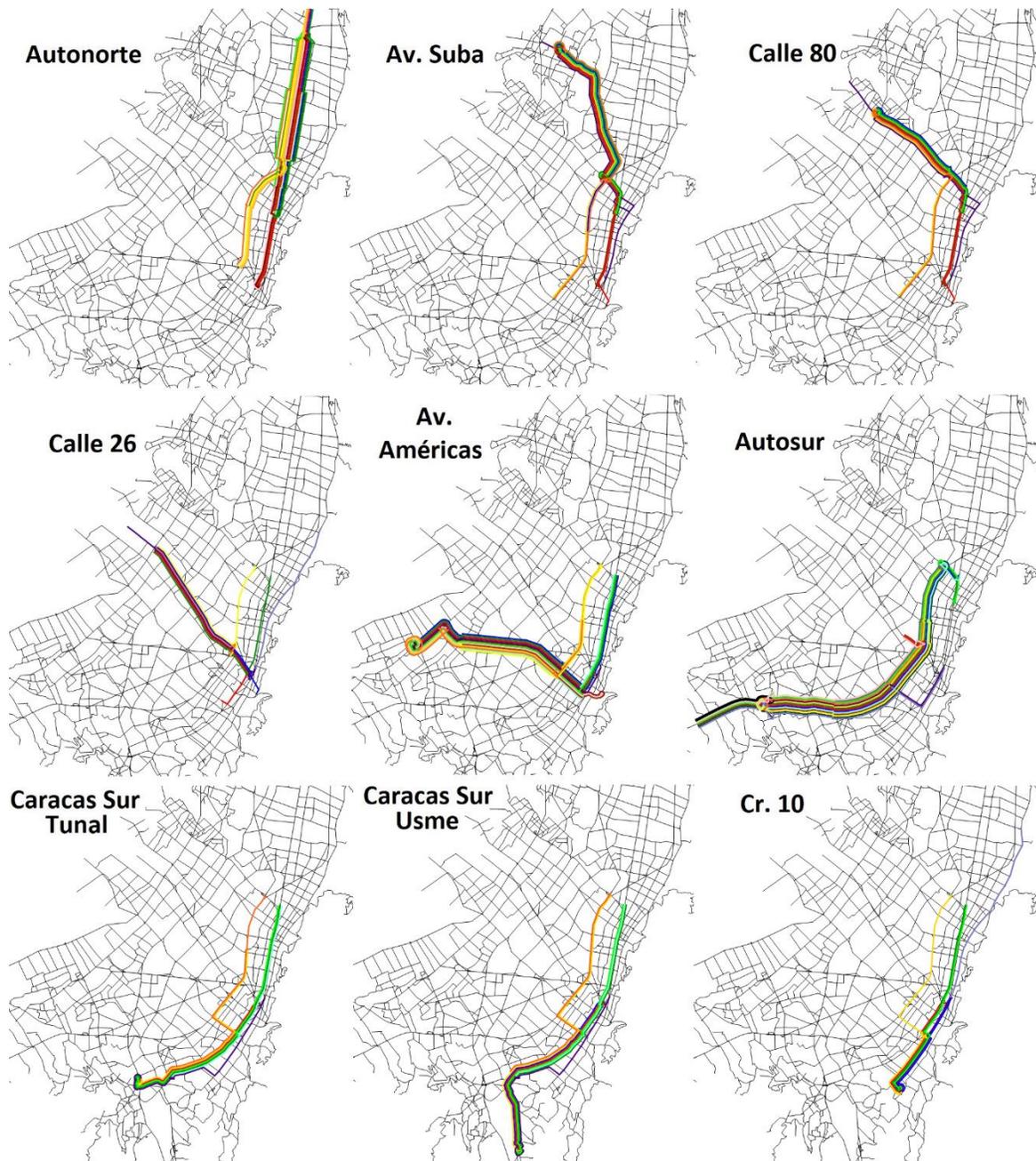
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 3-32:** Regresión para estaciones de los corredores de origen



Fuente: Elaboración propia.

Mientras tanto, en la regresión para estaciones del centro ampliado -Figura 3-31- se ha obtenido un valor ligeramente más alto para la correlación con respecto al caso del escenario 1. Adicionalmente, se evidencia que la estación de Marly debería poseer dos rutas adicionales. Por lo tanto, se asigna parada en esta estación a dos de las rutas expresas, las provenientes del Portal 80 y del Portal Dorado, portales que no tenían asignada conexión directa con Marly. Así mismo, se evidencia que las estaciones Simón Bolívar, Movistar Arena, El Campin, CAD y Paloquemao -todas en la zona NQS Central- poseen un exceso de rutas. Se procede entonces a suprimir la parada de dos o tres rutas -procedentes de diferentes corredores troncales- en cada una de estas estaciones.

**Figura 3-33:** Red de rutas radiales con enfoque de diseño multicriterio

Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Continuando con la correlación entre pasajeros y rutas asignadas a cada estación, al realizar la regresión para las estaciones de los diferentes corredores de origen -Figura 3-32-, se evidencia un comportamiento similar al registrado en el escenario 1: la correlación no es tan clara, si bien su valor mejora en esta ocasión. Para este caso aplica

la misma explicación dada en la Figura 3-22 de la subsección 3.4.1. Sin embargo, en el caso actual no se ha considerado necesario realizar cambios manuales a las paradas asignadas en los corredores de origen.

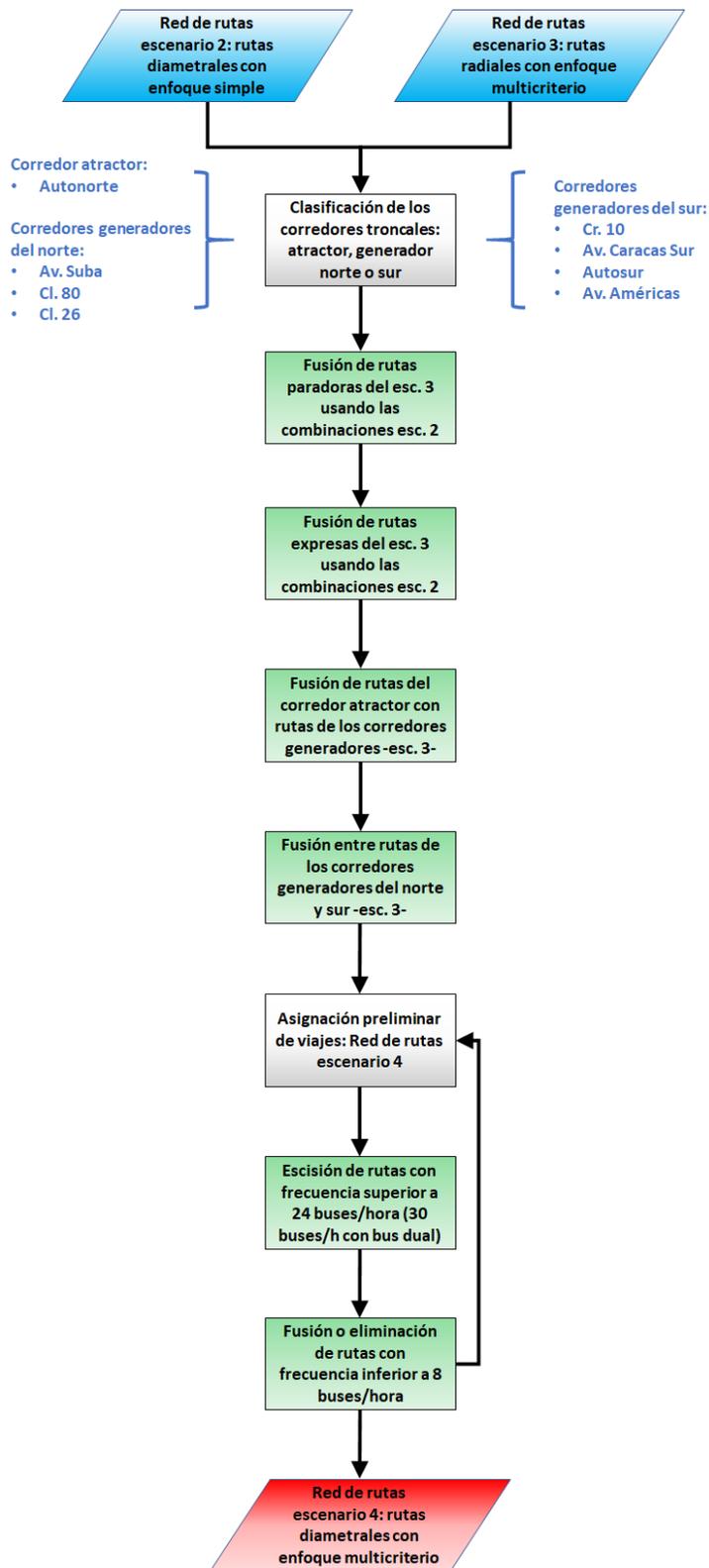
Para terminar esta subsección, la Figura 3-33 muestra la red que ha sido desarrollada para el escenario 3 de rutas radiales con enfoque multicriterio.

### **3.4.6 Escenario 4: rutas diametrales con enfoque de diseño multicriterio**

En este caso las rutas fueron generadas mediante un proceso heurístico -ver la Figura 3-34- similar al usado para crear las rutas del escenario 2: se han fusionado las rutas radiales con enfoque multicriterio obtenidas en el escenario 3, pero teniendo en cuenta lo que se construyó para el escenario 2. Esto implica que se han replicado las fusiones de servicios paradores y expresos, utilizando las mismas combinaciones entre corredores troncales del norte y del sur que se describieron en la Tabla 3-1 de la subsección 3.4.1. Sin embargo, dado que con un enfoque de diseño multicriterio se genera un mayor número de rutas que con el enfoque simple, después de emular las combinaciones del escenario 2, aún ha quedado una cantidad significativa de servicios radiales -que vienen del escenario 3- para fusionar. A partir de este momento, el proceso heurístico implementado comienza a diferir respecto a lo que se hizo para generar las rutas diametrales con enfoque simple.

En primer lugar, los corredores troncales se han clasificado de una manera un poco distinta. Si bien se mantiene la división entre corredores del norte y del sur, ahora se integra una evaluación de si cada corredor sirve a una zona atractora o generadora de viajes. La conclusión, al analizar la matriz de viajes construida, es que todos los corredores troncales sirven en zonas predominantemente generadoras de viajes desde los portales hacia el centro ampliado de la ciudad -ver subsección 3.3.3-. Sin embargo, existe un corredor troncal cuya zona de influencia posee una atracción de viajes particularmente alta: la Autopista Norte. Las figuras de la subsección 3.3.3 ilustran como una porción apreciable de los deseos de viaje, desde los demás corredores troncales, se dirigen a este corredor. Por ende, cada corredor deberá tener al menos un servicio directo que lo conecte con la Autopista Norte.

**Figura 3-34:** Proceso heurístico para la generación de la red de rutas del escenario 4



Fuente: Elaboración propia.

Otra diferencia frente al escenario 2 radica en que el lineamiento allí usado fue que debían existir conexiones directas entre algunos -no todos- los corredores del norte y del sur. En el presente caso el lineamiento cambia a que deben existir conexiones directas entre todos los corredores del norte con todos los corredores del sur, tal como se muestra en la Tabla 3-2 -una única excepción es que no se requiere conexión directa entre los corredores Av. Américas y Calle 26-. La clasificación de los corredores puede observarse en la Figura 3-34.

**Tabla 3-2:** Corredores de origen y destino para las rutas fusionadas del escenario 4

<b>Punto Origen/Corredor</b>	<b>Autonorte</b>	<b>Av. Suba</b>	<b>Cl. 80</b>	<b>Cl. 26</b>
<b>Av. Suba Portal</b>	X			
<b>Cl. 80 Portal</b>	X			
<b>Cl. 26 Portal</b>	X			
<b>Av. Américas Portal</b>	X	X	X	
<b>Av. Américas Banderas</b>	X		X	
<b>Autosur Portal</b>	X	X	X	X
<b>Autosur San Mateo</b>	X			X
<b>Autosur Gral. Santander</b>	X			
<b>Av. Caracas Sur P. Tunal</b>	X	X		X
<b>Av. Caracas Sur P. Usme</b>	X	X	X	X
<b>Av. Caracas Sur Calle 40 S</b>	X		X	
<b>Cr. 10 Portal</b>	X	X	X	X

La Tabla 3-2 también muestra otra de las diferencias entre el enfoque simple y el enfoque multicriterio. Se trata de que para este escenario se han generado rutas parciales entre estaciones intermedias. Puede observarse que se han diseñado rutas desde las estaciones de Banderas, Gral. Santander y Calle 40 Sur. Lo mismo aplica para la estación San Mateo, aunque también se diseñaron rutas para esta estación en el escenario 2 -diseño simple- debido a la configuración geográfica del corredor Autosur. Además, y aunque no aparecen en la tabla, también se diseñaron rutas parciales hacia o desde las estaciones Toberín y Alcalá en la Autonorte. Los criterios utilizados para escoger estas estaciones intermedias fueron:

- Estaciones de alta demanda, al menos un volumen de pasajeros equivalente al 25% del volumen en su respectivo portal.

- Existencia de rutas alimentadoras o complementarias que alimenten la estación.
- Presencia de un retorno operacional cercano -a menos de 1 Km.- que permita a los buses hacer el giro de manera eficiente.

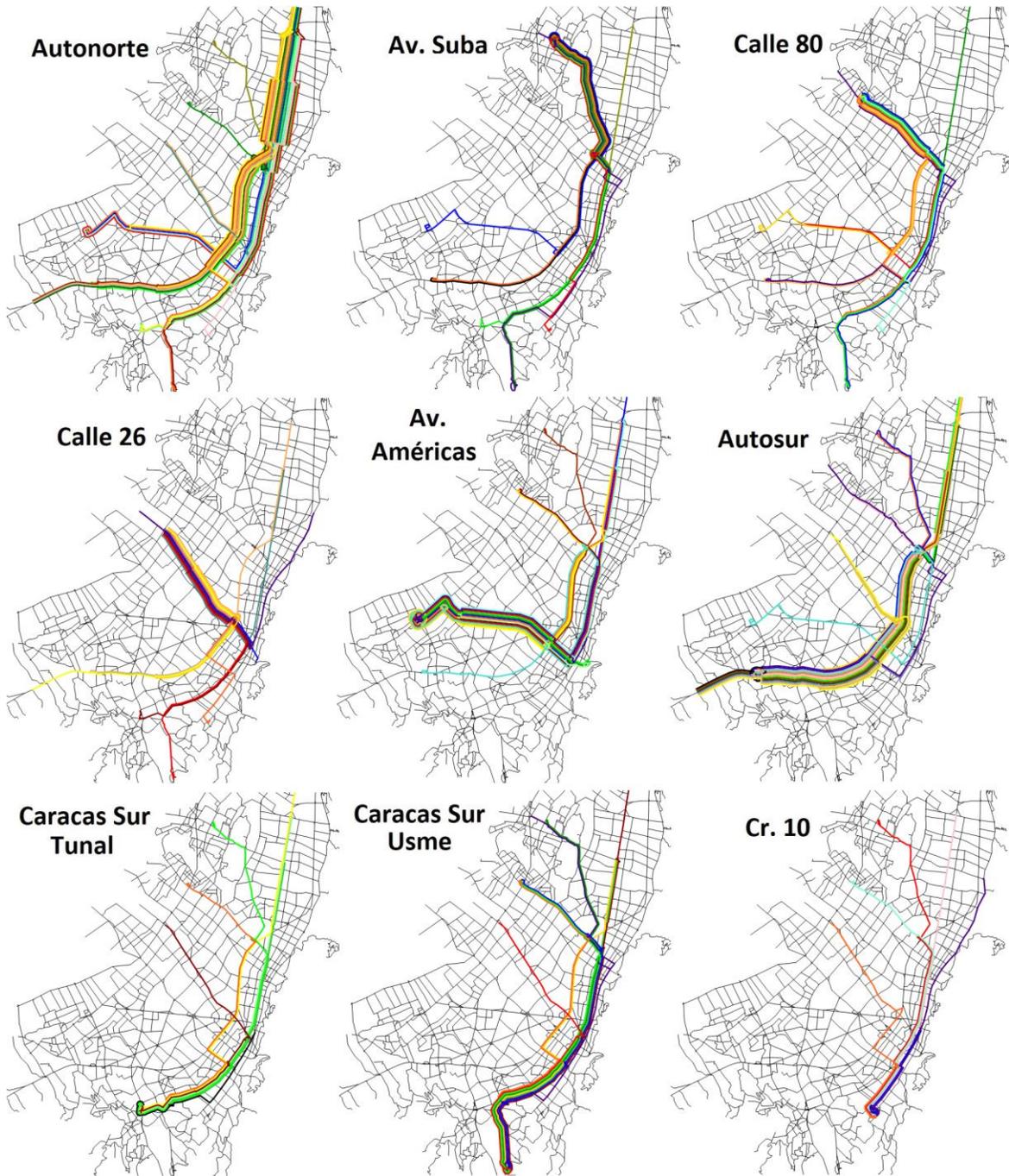
Habiendo explicado las anteriores generalidades, se procede a fusionar rutas de cada corredor con rutas de la Autonorte, tal como se describe en la Figura 3-34. Una vez se completan las conexiones requeridas, se procede a fusionar servicios de los corredores norte y sur, para cumplir con lo especificado en la Tabla 3-2. En este caso, se permite fusionar una misma ruta radial varias veces, a diferencia del escenario 2, en el cual una misma ruta solo podía fusionarse una sola vez. En el ejercicio desarrollado, 11 rutas tuvieron que ser fusionadas dos veces, 64 rutas una única vez y 10 rutas no se fusionaron, conservando su configuración radial. Estas últimas corresponden a servicios que tienen como destino las estaciones Las Aguas, Universidades y Museo Nacional, cuya configuración geográfica no es apta para el diseño de rutas diametrales.

Por otra parte, aunque se trató de respetar el lineamiento dado en el escenario 2 acerca de fusionar servicios radiales que tuvieran como destino las mismas zonas, esto no fue posible en todos los casos en el escenario 4. Por lo tanto, podrán verse rutas diametrales fusionadas que atienden simultáneamente las zonas de destino 1 -Av. Caracas Central- y 2 -Héroes-.

Para culminar el diseño de las rutas diametrales con enfoque multicriterio, se ha procedido a escindir servicios con frecuencia mayor a 24 buses/hora o a eliminar o fusionar rutas con frecuencia menor a 8 buses/hora. Para esto, de la misma forma que en el escenario 3, ha sido necesario realizar una asignación provisional de viajes en el modelo de transporte.

Finalmente, e igual a lo que se decidió en el escenario 2, puesto que estas rutas diametrales se generan directamente de la fusión de los servicios radiales del escenario 3, y a que estos últimos ya han pasado las comprobaciones descritas en la subsección 3.4.5, no se ha considerado necesario realizar nuevas comprobaciones a las rutas diametrales del escenario 4, relativas a conectividad, número mínimo de rutas por estación o correlación entre pasajeros y rutas por estación. La Figura 3-35 muestra la red obtenida de rutas diametrales con enfoque de diseño multicriterio.

**Figura 3-35:** Red de rutas diametrales con enfoque de diseño multicriterio

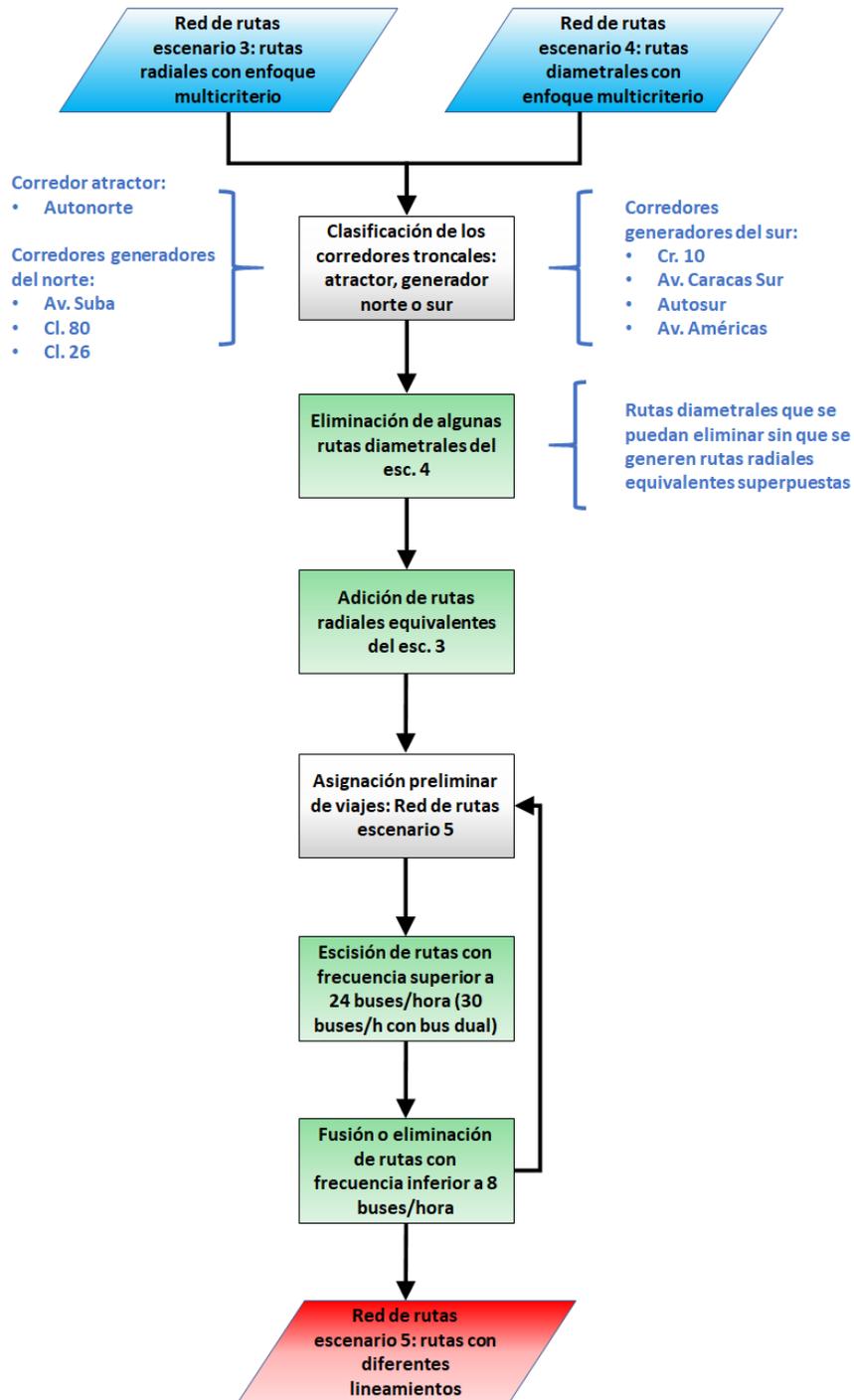


Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

### 3.4.7 Escenario 5: rutas con diferentes lineamientos

El proceso heurístico para el último escenario se muestra en la Figura 3-36.

**Figura 3-36:** Red de rutas radiales con enfoque de diseño simple



Fuente: Elaboración propia.

El quinto escenario consiste en la generación de rutas tomando elementos de los diferentes grupos de lineamientos según convenga. Sin embargo, tal como se anotaba en la sección 2.3, el resultado que se espera no es precisamente una red de rutas simple, debido a que en este escenario se mezclan servicios de distintos tipos. Por lo tanto, se ha dado prioridad a las filosofías de diseño multicriterio, diametral y radial.

El proceso heurístico propuesto hace uso de la misma clasificación de corredores troncales del escenario 4 y toma como punto de partida la red de rutas diametrales con enfoque multicriterio. Para comenzar, se procede a eliminar algunos de estos servicios diametrales para reemplazarlos con servicios radiales. El criterio para ello es que al eliminar una ruta diametral, no sea necesario reemplazarla con dos rutas radiales que presenten superposición entre ellas. Existen dos zonas de destino en el centro ampliado en las que se cumple relativamente bien esta condición: la zona 2 “Héroes” y por supuesto, la zona 4 “Museo Nacional”, gracias a la presencia de una estación central de intercambio en este último caso. De este modo, se da prioridad a rutas radiales que tengan como destino estas dos zonas, sin que sea obligatorio que todos los servicios que hacia allí se dirijan tengan que ser radiales. Según el caso, se han conservado rutas diametrales de acuerdo al criterio y a la experiencia del investigador. Se ha tomado también muy en cuenta la configuración de los deseos de viajes de los usuarios, según el análisis de la subsección 3.3.3.

Una vez se han eliminado algunas de las rutas diametrales según los criterios descritos en el párrafo anterior, se procede a reemplazarlas con los servicios radiales equivalentes del escenario 3. De esta forma se garantiza la conectividad de la nueva red de rutas. Además, dado que las rutas del escenario 4 son herederas de las del escenario 3, al volver a utilizar de forma parcial algunas rutas radiales equivalentes de este escenario, es posible mantener la coherencia en la asignación de puntos de parada en las diferentes estaciones de la red troncal.

En los últimos pasos, y de manera similar a los dos escenarios anteriores, mediante una asignación preliminar de viajes se procede a escindir rutas que requieran una alta frecuencia de buses y a eliminar o fusionar rutas con frecuencias muy bajas.

**Tabla 3-3:** Distribución de rutas radiales y diametrales en el escenario 5

Corredor/Zona	Zona 1: Av. Caracas Central	Zona 2: Héroes	Zona 3: NQS Central	Zona 4: Museo Nacional
<b>Autonorte</b>	2D	3R+5D	9D	
<b>Av. Suba</b>	2D	2R+2D	3D	1R
<b>Calle 80</b>	1R+2D	2R+3D	3D	1R
<b>Calle 26</b>	2R+1D	1D	5D	1R
<b>Av. Américas</b>	3R+3D	2R+3D	4D	1R
<b>Auto Sur</b>		2R+1D	10D	2R
<b>Av. Caracas Sur Tunal</b>	1R+1D	1R+2D	2D	1R
<b>Av. Caracas Sur Usme</b>	2D	2R+2D	3D	1R
<b>Cr. 10</b>	1D	1R+2D	1D	2R

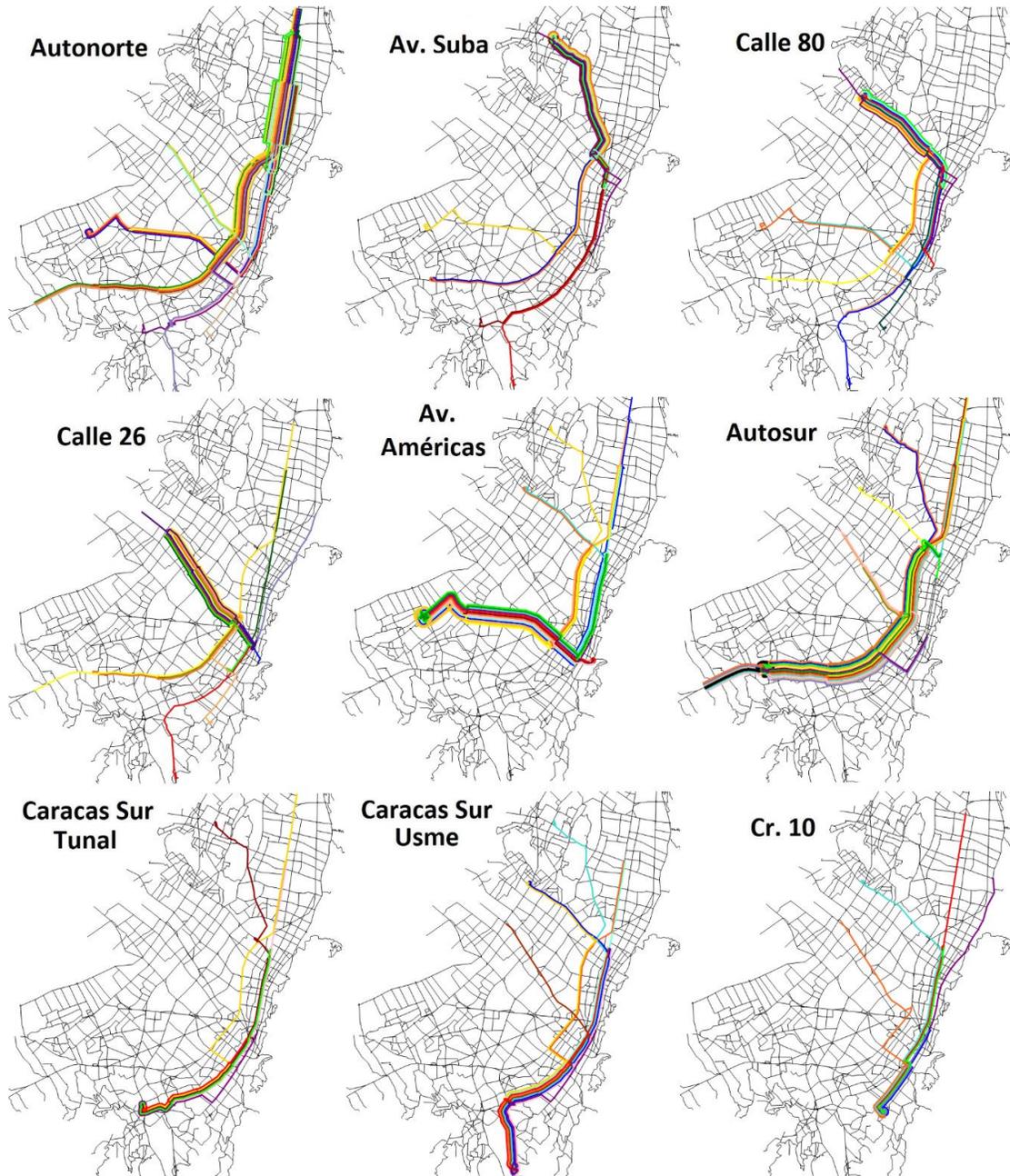
**Tabla 3-4:** Corredores de origen y destino con conexión directa en el escenario 5

Punto Origen/Corredor	Autonorte	Av. Suba	Cl. 80	Cl. 26
<b>Av. Suba Portal</b>	-			
<b>Cl. 80 Portal</b>	-			
<b>Cl. 26 Portal</b>	X			
<b>Av. Américas Portal</b>	X	X	X	
<b>Av. Américas Banderas</b>	X		X	
<b>Autosur Portal</b>	X	X	X	X
<b>Autosur San Mateo</b>	X			X
<b>Autosur Gral. Santander</b>	X			
<b>Av. Caracas Sur P. Tunal</b>	X	X		-
<b>Av. Caracas Sur P. Usme</b>	X	X	X	X
<b>Av. Caracas Sur Calle 40 S</b>	X		X	
<b>Cr. 10 Portal</b>	X	-	X	X

Por otra parte, la Tabla 3-3 da una idea de cómo ha quedado la distribución final entre rutas radiales y diametrales, según los corredores troncales de origen y las zonas de destino. Por ejemplo, desde el corredor Av. Américas habría tres rutas radiales y tres diametrales que se dirigen a la zona 1, dos rutas radiales y tres diametrales que cubren la zona 2, cuatro servicios diametrales para la zona 3 y un único servicio radial hacia la zona 4. De manera adicional, de la tabla puede concluirse que solo se han diseñado unos pocos servicios radiales para la zona 1, para la zona 2 los servicios están repartidos entre rutas radiales y diametrales, para la zona 3 solo hay servicios diametrales -esto

como consecuencia de que no existe una estación central en la NQS-, y para la zona 4 solo se han generado servicios radiales. Entre tanto, la Tabla 3-4 -página anterior- muestra las conexiones directas resultantes en el escenario 5. Las casillas marcadas con guion corresponden a pares de origen y destino que estaban conectados por una ruta diametral en el escenario 4, pero no en el esc. 5.

**Figura 3-37:** Red de rutas con diferentes lineamientos



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

## **3.5 Descripción del proceso de asignación de viajes**

En esta sección se describirá el proceso de asignación de viajes en el modelo de transporte. En primer lugar, se explicará cómo se ha calibrado el modelo. En segundo lugar, se detallará el proceso iterativo de asignación de viajes diseñado para la correcta estimación de los intervalos de paso de los servicios.

### **3.5.1 Calibración del submodelo**

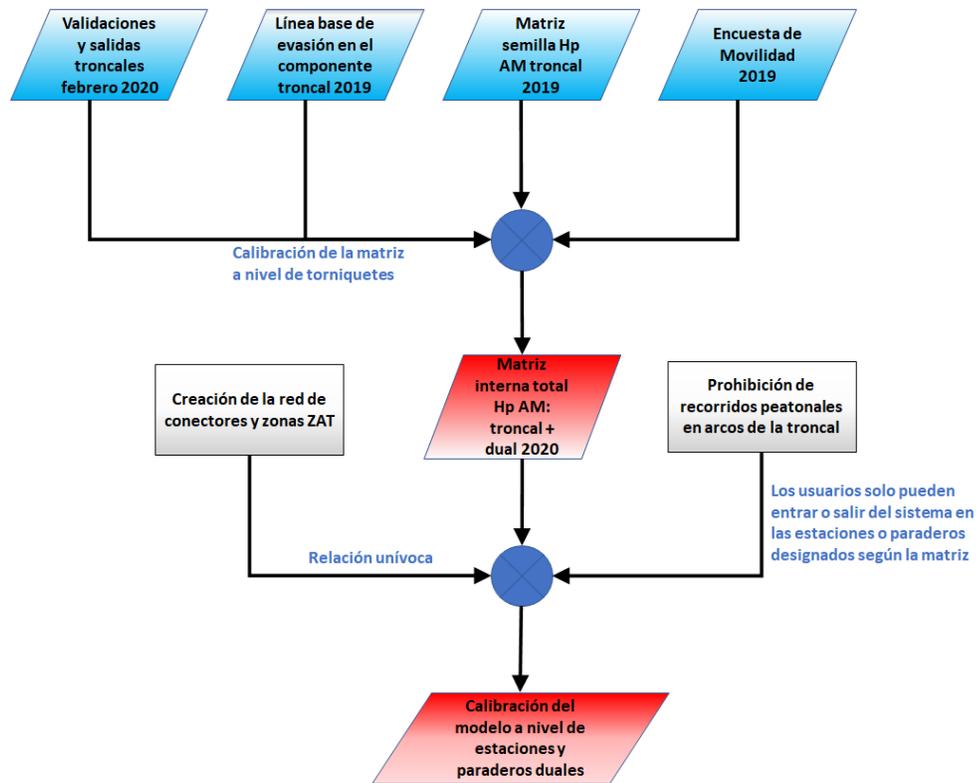
Tal como se explicó en la sección 3.3, la matriz origen-destino fue estimada tomando como base de referencia los viajes entre las distintas estaciones del componente troncal y paraderos del componente dual. En esa misma sección se indicó que cada estación o paradero dual estaría asociado a una zona ZAT de manera unívoca, mediante un único conector bidireccional por donde debe entrar y salir toda la demanda.

Así mismo, la demanda en cada estación o paradero dual, tanto para viajes de origen como viajes de destino, fue calibrada utilizando las validaciones y salidas reales registradas en los torniquetes, aplicando un factor de corrección según el documento de línea base de la evasión [83].

Por último, la red vial del modelo de transporte del componente troncal se ha configurado de tal modo que queden prohibidos los recorridos peatonales a lo largo de los arcos troncales. Esto garantiza que los usuarios solo puedan acceder o salir del sistema por la estación o paradero marcados como su origen o destino en la matriz de viajes. Por lo tanto, se logra una calibración del modelo, a nivel de estaciones y paraderos duales, altamente precisa en cualquiera de los escenarios.

En lo sucesivo, el trabajo del modelo será simular las escogencias de ruta y transbordos por parte de los usuarios en un sistema cerrado, tal como se ha considerado a la troncal de TransMilenio una vez que el usuario ha cruzado los torniquetes. La Figura 3-38 resume lo aquí planteado.

**Figura 3-38:** Calibración del modelo de transporte a nivel de estaciones y paraderos duales.

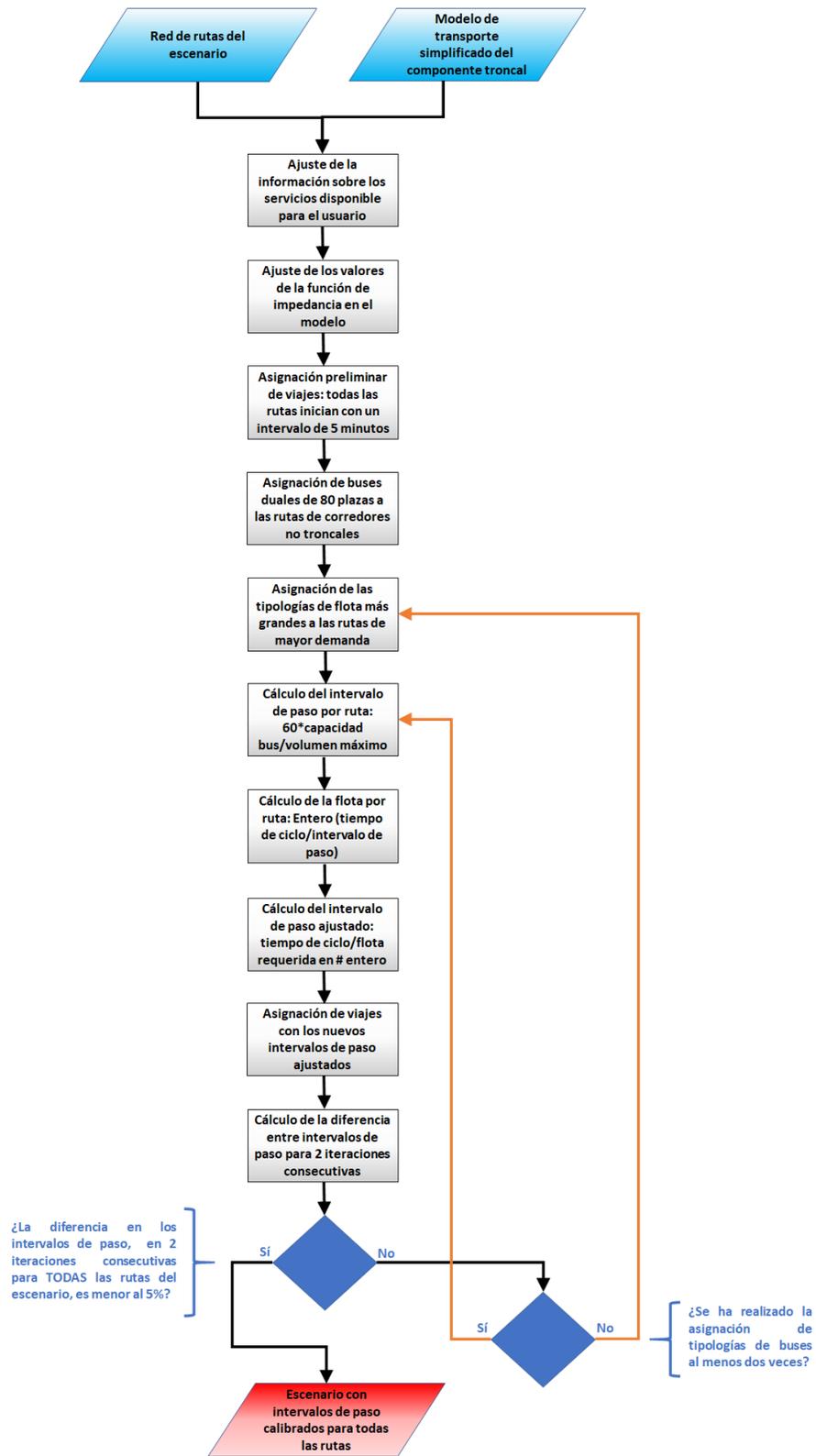


Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2 Metodología iterativa para la asignación de viajes

La Figura 3-39 muestra el proceso iterativo que se ha seguido para la correcta calibración de los intervalos de paso de las rutas en los diferentes escenarios.

Figura 3-39: Proceso iterativo para el submodelo de asignación de viajes.



Fuente: Elaboración propia.

Partiendo del modelo de transporte implementado y de cada red de rutas diseñada con los diferentes conjuntos de lineamientos, lo primero que debe realizarse es definir el nivel de conocimiento sobre la operación de los servicios que los hipotéticos usuarios tendrían. Esto se hace tomando en cuenta la posibilidad que ofrece PTV-Visum en su submodelo de “Elección para decisiones de abordaje” - Choice model for boarding decisions- [86], para implementar diferentes escenarios de asignación de viajes según el acceso a información sobre la operación que tengan los usuarios. En el presente trabajo se ha trabajado con dos posibilidades:

- **Salidas desde la plataforma de abordaje:** cada usuario tiene información sobre el momento en que partirán los próximos servicios en la plataforma en la cual se encuentra. Esto es muy cercano a lo que pasa en la actualidad en el sistema TransMilenio, en cuyas estaciones los usuarios pueden encontrar tableros electrónicos con la información de la hora de arribo de los próximos servicios que paran en la respectiva plataforma. En una primera fase, todos los escenarios serán modelados tomando como cierta esta alternativa.
- **Información completa:** cada usuario tiene a su disposición información no solo sobre la partida de los próximos servicios en su plataforma de abordaje, sino también en las otras estaciones del sistema. Además, el usuario puede acceder a esta información también a bordo de los buses, mientras realiza su viaje. En la práctica, esto puede realizarse mediante una aplicación móvil para los usuarios, que cuente con un planificador de viajes que integre y analice la información en tiempo real de los diferentes servicios para sugerirle al usuario estrategias de viaje. En una segunda fase de modelación, se simularán algunos escenarios seleccionados utilizando esta opción.

El segundo paso es la parametrización de la función de impedancia de cada escenario, según lo que se plasmó en la sección 4.1. En tercer lugar, se ejecuta una asignación de viajes suponiendo que todas las rutas tienen un intervalo de paso de 5 minutos.

Después de obtener una primera asignación de viajes, se procede a asignar las diferentes tipologías de buses disponibles a los servicios. Hoy en día -año 2020-, existen 3 tipos de buses que ofrecen su servicio en el sistema troncal de Bogotá:

- **Buses duales de 80 pasajeros:** estos buses serán asignados a las rutas con tramos por corredores no troncales. El único corredor no troncal que se exceptúa de esta regla es Portal Usme – Molinos.
- **Buses biarticulados de 240 pasajeros:** estos buses serán asignados a las rutas con mayor volumen de pasajeros, según uno de los principios aconsejados por algunos de los expertos entrevistados.
- **Buses articulados de 160 pasajeros:** estos buses serán asignados a las rutas restantes, después de haber asignado los buses biarticulados.

Se ha tratado de utilizar una proporción de 2:1 entre biarticulados y articulados, es decir, 2 buses biarticulados por cada bus articulado. Esto para emular la distribución de flota que se verá en TransMilenio cuando se cuente con todos los buses de las fases I y II de la licitación que se realizó en 2018 [87].

Una vez se ha asignado la tipología de flota a cada una de las rutas, se procede a calcular el intervalo de paso de los servicios de acuerdo al volumen máximo de demanda de cada uno. Para ello se aplican de manera consecutiva las siguientes ecuaciones:

**Cálculo del intervalo de paso por ruta:**

$$I_{paso} = 60 * \frac{Cap_{bus}}{Vol_{max}} \quad (3.19)$$

**Cálculo de la flota por ruta:**

$$Flota_{ruta} = Redondear.mas\left(\frac{t_{ciclo}}{I_{paso}}\right) \quad (3.20)$$

**Cálculo del intervalo de paso ajustado:**

$$I_{paso\ ajus} = \frac{t_{ciclo}}{Flota_{ruta}}; I_{paso\ ajus} \leq 7,5 \text{ minutos} \quad (3.21)$$

Donde:

- $I_{paso}$  corresponde al intervalo de paso preliminar de cada ruta.

- $Cap_{bus}$  es la capacidad de la tipología de bus usada en la ruta.
- $Vol_{max}$  es el volumen máximo de pasajeros en la ruta, de acuerdo a los resultados de la simulación.
- $Flota_{ruta}$  es la cantidad de buses requeridos para satisfacer la demanda de la ruta y debe ser un número entero.
- $t_{ciclo}$  es el tiempo de ciclo -ida y vuelta- de la ruta.
- $I_{paso\ ajus}$  corresponde al intervalo de paso de la ruta, una vez se han hecho los ajustes finales al cálculo. Debe ser menor a 7,5 minutos (Estándar BRT) [73].

Con los nuevos intervalos de paso ajustados se efectúa otro proceso de asignación de viajes. En ese momento, lo que se espera es que las rutas con mayor carga de pasajeros requieran intervalos de paso más cortos, y por ende, se vuelvan más atractivas en cada iteración. Exactamente lo contrario debería ocurrir con las rutas con menor carga de pasajeros. De cualquier modo, después de cierto número de iteraciones, el sistema debería converger hacia unos intervalos de paso estables para todas las rutas, intervalos que no cambiarían apreciablemente entre una y otra iteración.

El criterio utilizado para detener las iteraciones es que los intervalos de paso de todas las rutas no difieran en más de un 5% entre iteraciones consecutivas. En la práctica, esto se ha logrado para todos los escenarios después de 10 o 12 iteraciones. Además, solamente en las dos primeras iteraciones se realiza la asignación de flota a los servicios. Si en todas las iteraciones se asignara flota, lo que se ha visto es que probablemente el sistema no sea convergente y nunca se encuentre una solución estable.

El resultado final es la calibración de los intervalos de paso de todas las rutas de cada escenario. Es en este punto en el que se extraen los resultados finales de la modelación.



## **4. Cuantificación del impacto operacional y lineamientos generales para el diseño de rutas**

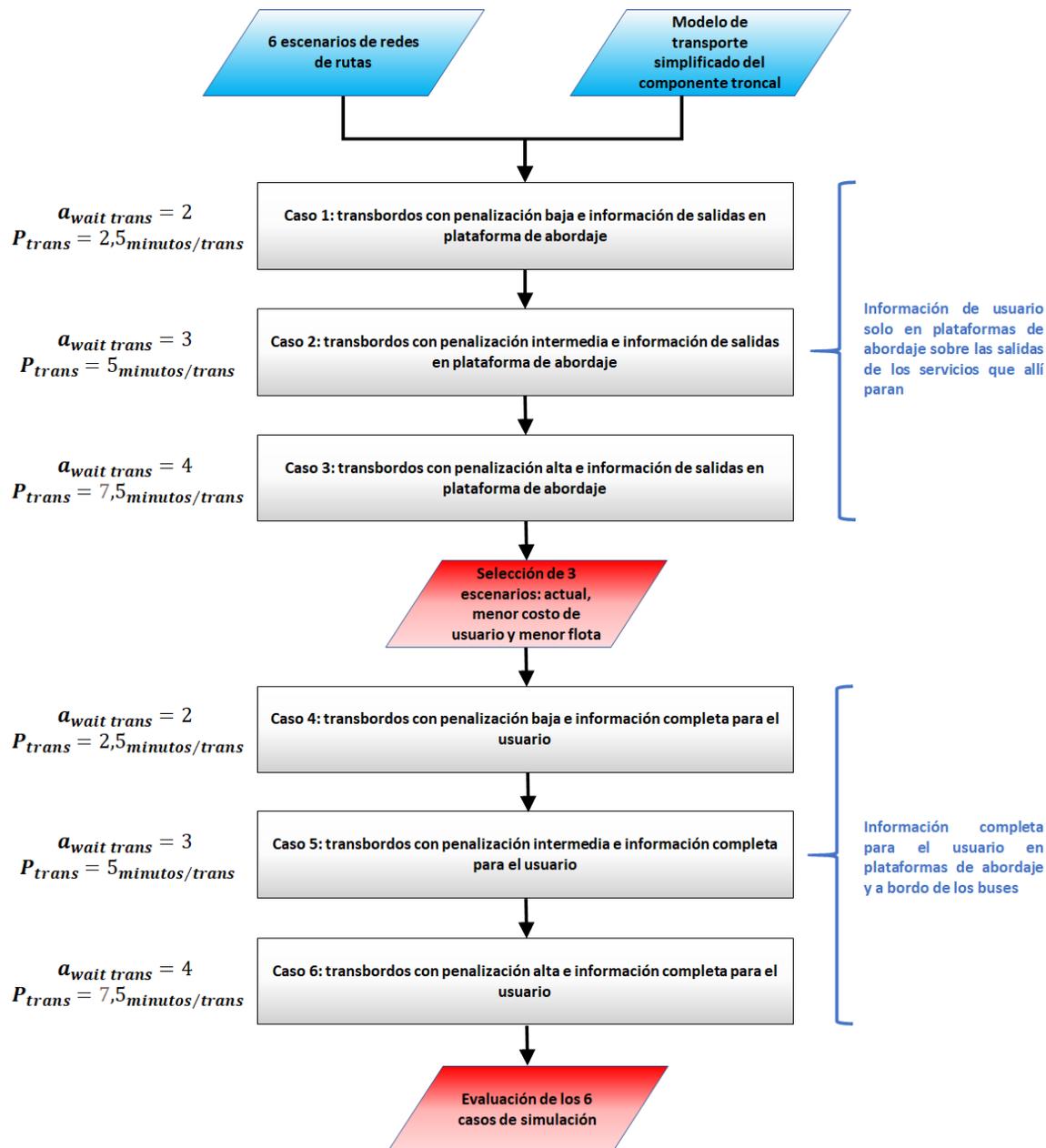
En este capítulo se presentará la ejecución de la metodología descrita en el capítulo anterior. Esta ejecución puede entenderse como la simulación del submodelo de asignación de viajes para cada escenario de rutas, y la obtención de los correspondientes resultados desde el modelo de transporte. A continuación, se explicará cómo a partir de los 6 escenarios de redes de rutas definidos en la sección 3.4, se han generado 27 simulaciones que permiten cuantificar las variables operacionales escogidas, y por ende, las funciones objetivo que se usan para medir el impacto operacional de los distintos conjuntos de lineamientos. Se hace hincapié en que cada simulación debe entenderse como una ejecución del submodelo de asignación de viajes, tomando como punto de partida un caso de penalización de transbordos y su respectivo escenario de redes de rutas.

Además, se realizará un análisis del impacto operacional que cada conjunto de lineamientos – con su respectivo escenario de redes de rutas – tiene sobre los resultados obtenidos en cada simulación. De este modo será posible seleccionar y enunciar los lineamientos para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP que produzcan un impacto más positivo, dando así respuesta al problema de investigación. Finalmente, y como aporte adicional, se emitirán algunos lineamientos sobre el uso de Sistemas de Información al Usuario, y su incidencia en las variables operacionales definidas.

## 4.1 Casos de simulación y resultados cuantificados

Los escenarios de redes rutas se modelan en 6 casos de simulación -27 simulaciones en total-, tal como se muestra en la Figura 4-1.

**Figura 4-1:** Estructura de los casos de simulación.



Fuente: Elaboración propia.

En los 3 primeros casos se simulan los 6 escenarios de redes de rutas, asumiendo que el usuario dispone de la información sobre el momento de salida de los servicios que paran en la plataforma de abordaje donde se encuentra, y tomando 3 niveles diferentes de penalización de los transbordos: bajo, medio y alto. Hasta aquí, se tienen 18 simulaciones.

De estos tres primeros casos de simulación se seleccionan 3 conjuntos de rutas: el conjunto de rutas actual 2020, el que genere el menor costo para el usuario y el que genere el menor requerimiento de flota. Estos 3 conjuntos de rutas serán simulados en 3 nuevos casos – 9 simulaciones más, para completar 27 – en los que se mantienen los 3 niveles de penalización de transbordos, y se asume que el usuario dispone de información completa sobre el sistema de transporte: es decir, cuenta con una aplicación con datos en tiempo real y planificador de viajes.

Para revisar los detalles sobre la penalización de los transbordos el lector puede consultar la subsección 3.1.3. Para detalles sobre la información con la que cuenta el usuario, remitirse a la subsección 3.5.2. Entre tanto, la Tabla 4-1 resume los resultados cuantificados de las simulaciones en cada caso.

La columna “Tiempo Promedio Perc.” corresponde a la cuantificación de la función de impedancia  $F_U$  explicada en la sección 3.1.3, mientras que la columna “Tiempo Promedio Neto” representa el tiempo de viaje sin aplicar factores que representen la ponderación que hace el usuario sobre los tiempos de espera, a bordo y transbordo. Por su parte, la columna “Flota Total Sillas” hace referencia al número mínimo requerido de plazas, que resulta de sumar las sillas de requeridas de buses duales, articulados y biarticulados. Nótese que también se presenta el requerimiento de buses por tipología. La Tabla 4-1 también presenta el porcentaje de viajes según el número de transbordos requeridos, para cada uno de los casos simulados.

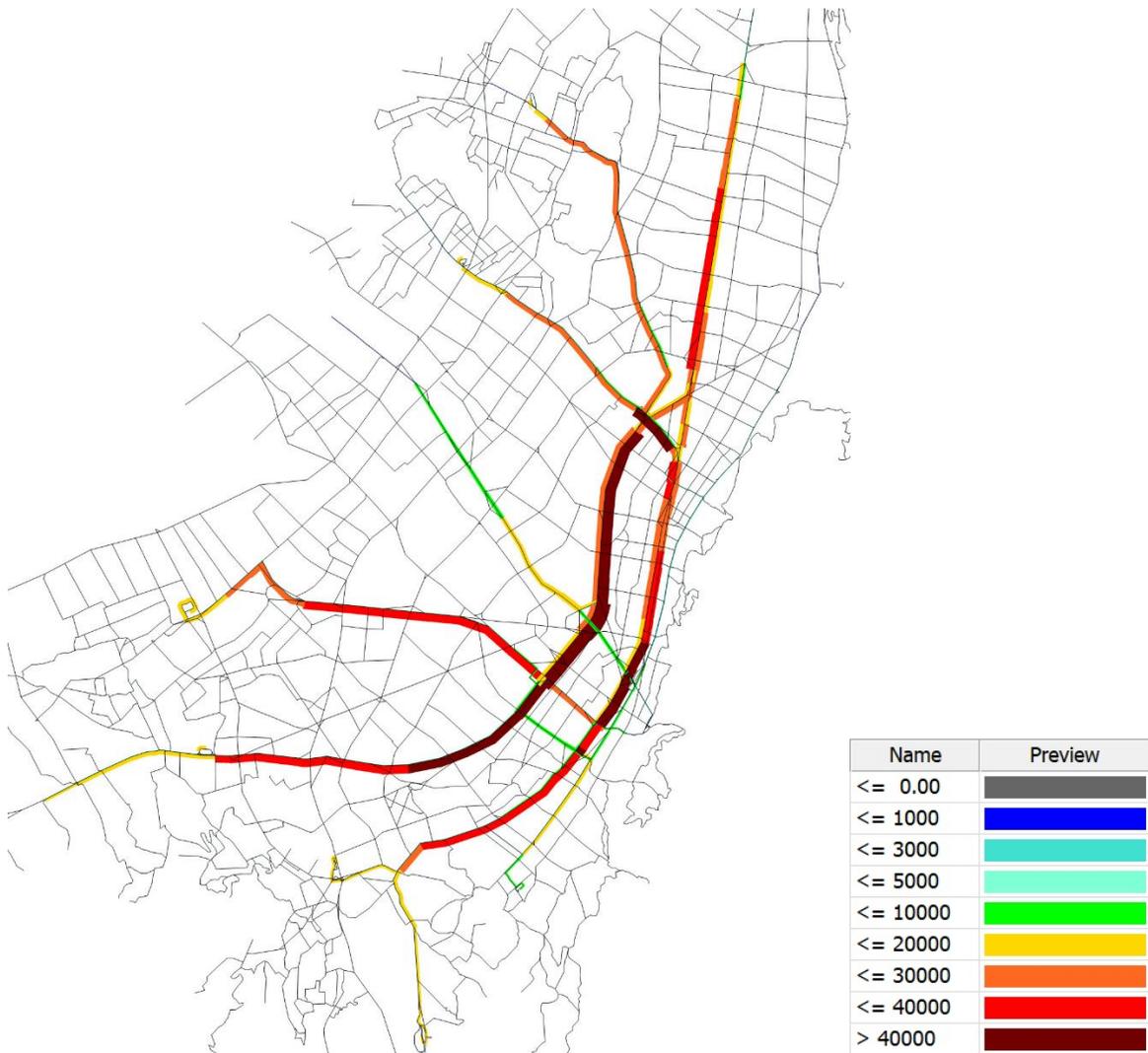
Es conveniente resaltar que los resultados presentados en la Tabla 4-1 muestran el cálculo de las dos funciones objetivos definidas – tiempos de viaje percibidos y flota mínima requerida – y por lo tanto, estos datos constituyen la cuantificación del impacto de los distintos conjuntos de lineamientos para el diseño de rutas troncales.

**Tabla 4-1:** Resultados cuantificados de los casos y escenarios de redes de rutas

Escenario		Tipología (Plazas/Bus)			Flota Total		Tiempo Promedio (minutos)		% Viajes # transbordos			
Caso	Esc.	80	160	240	Buses	Sillas	Perc.	Neto	0	1	2	3
1	0	422	678	1245	2345	441040	46,7	41,7	14,1%	38,6%	33,2%	14,0%
1	1	330	554	1321	2205	432080	48,3	41,9	6,2%	21,5%	30,4%	42,0%
1	2	743	620	1369	2732	487200	47,8	41,8	6,6%	21,7%	31,5%	40,1%
1	3	367	644	1164	2175	411760	47,9	41,9	9,6%	31,6%	35,4%	23,5%
1	4	511	766	1157	2434	441120	46,9	41,5	11,6%	36,9%	34,0%	17,5%
1	5	361	617	1249	2227	427360	47,0	41,6	10,5%	37,2%	34,6%	17,7%
2	0	341	755	1182	2278	431760	48,2	42,2	29,1%	48,7%	19,8%	2,4%
2	1	264	625	1219	2108	413680	50,6	42,3	12,2%	39,5%	36,3%	12,0%
2	2	585	587	1289	2461	450080	49,4	42,2	15,6%	43,0%	32,7%	8,7%
2	3	334	654	1083	2071	391280	50,7	42,5	16,5%	46,5%	31,1%	5,8%
2	4	446	644	1116	2206	406560	48,8	42,0	22,8%	49,9%	24,2%	3,2%
2	5	311	614	1117	2042	391300	49,4	42,3	20,6%	52,9%	23,9%	2,5%
3	0	343	683	1223	2249	430240	49,2	42,6	39,5%	48,4%	11,4%	0,7%
3	1	264	624	1190	2078	406560	52,6	42,7	16,5%	48,7%	30,7%	4,0%
3	2	544	574	1254	2372	436320	50,8	42,7	23,0%	52,1%	22,8%	2,1%
3	3	341	555	1117	2013	384160	52,9	43,1	21,4%	57,3%	20,5%	0,8%
3	4	426	642	1070	2138	393600	50,3	42,5	32,4%	54,7%	12,3%	0,5%
3	5	304	614	1128	2046	393280	50,9	42,7	28,0%	59,3%	12,4%	0,3%
4	0	400	604	1263	2267	431760	44,1	40,9	29,9%	49,2%	18,1%	2,8%
4	3	339	661	1098	2098	396400	45,6	41,1	15,8%	44,0%	29,8%	10,5%
4	4	499	651	1114	2264	411440	44,4	40,7	23,7%	49,7%	21,1%	5,6%
5	0	345	704	1193	2242	426560	46,0	41,6	41,5%	46,5%	11,5%	0,5%
5	3	308	604	1111	2023	387920	48,6	41,9	21,6%	55,9%	21,1%	1,4%
5	4	436	559	1126	2121	394560	44,8	41,6	32,9%	52,7%	13,6%	0,9%
6	0	330	701	1260	2291	440960	47,6	42,1	45,9%	46,3%	7,7%	0,2%
6	3	333	532	1144	2009	386320	51,0	42,4	24,0%	59,3%	16,4%	0,3%
6	4	405	597	1129	2131	398880	48,4	42,1	38,9%	51,6%	9,3%	0,2%

Finalmente, esta subsección presenta cartográficamente los resultados obtenidos para uno solo de los escenarios, a modo de guía y ejemplo. En el Anexo A será posible encontrar los resultados cartográficos de los 6 casos de simulación, conteniendo sus respectivos escenarios de redes de rutas generados con los distintos conjuntos de lineamientos. Las variables utilizadas en la cartografía son las siguientes:

**Figura 4-2:** Volumen de pasajeros por arco en el caso 2, escenario 0 -red de rutas 2020-



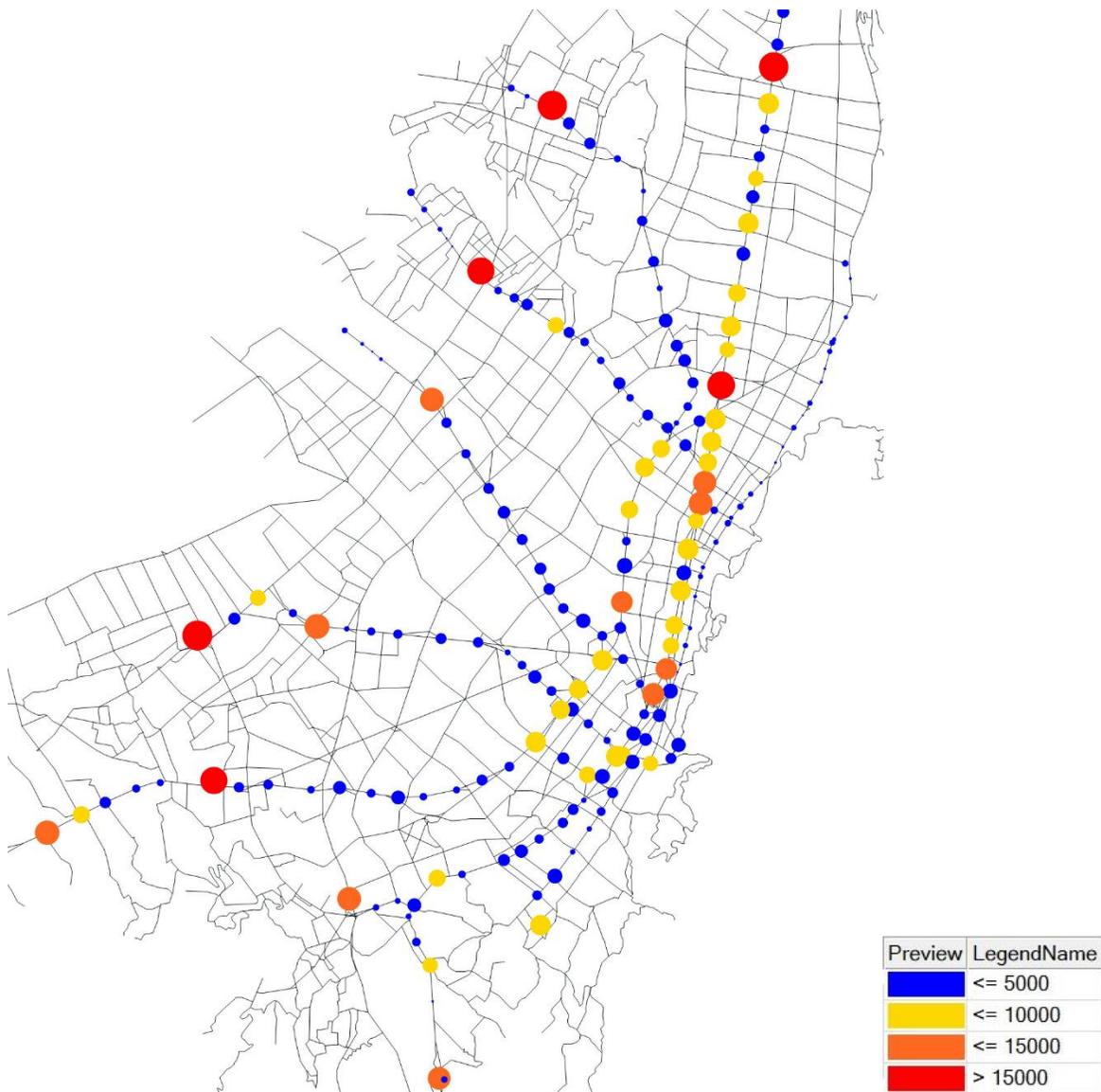
Fuente: Elaboración propia.

- **$Vol_{arco}$  (Volumen de pasajeros por arco):** volumen de pasajeros que circulan por un arco de transporte, a bordo de los buses durante el intervalo de modelación, el cual es la hora punta AM.
- **$Usuarios_{est}$  (Usuarios totales por estación):** sumatoria de todos los usuarios que hacen uso efectivo de una estación. Esto incluye a los usuarios que ingresan al sistema troncal por esta estación -estación de origen-, los que hacen transferencia -estación de transferencia-, y los que salen del sistema por este punto -estación de destino-. No se incluye a los usuarios que pasan por esta

estación a bordo de un bus, pero que siguen su trayecto dentro de la misma unidad de transporte.

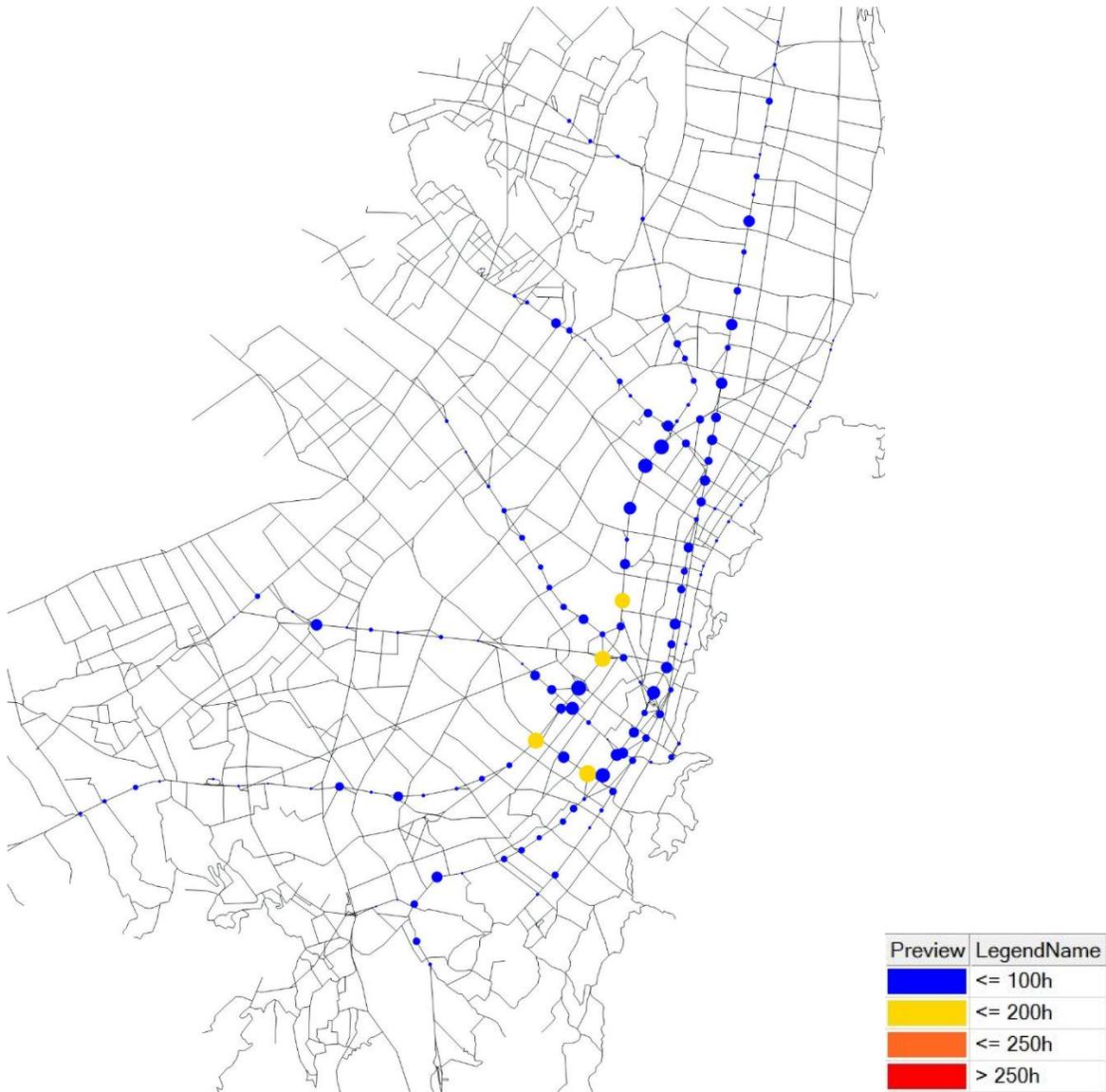
- $t_{trans\ est}$  (**Tiempo de transbordo total por estación**): sumatoria del tiempo total de espera, por un servicio de transbordo, de todos los usuarios que realizan transferencia en una estación. Esta variable no tiene en cuenta los tiempos de caminata dentro de la estación ni de espera por el primer servicio si es la estación de origen del usuario.

**Figura 4-3:** Usuarios totales por estación en el caso 2, escenario 0 -red de rutas 2020-



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4-4:** Tiempo de transbordo total por estación en el caso 2, escenario 0 -red de rutas 2020-



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-2 muestra el volumen de pasajeros en hora punta AM en los diferentes corredores del sistema troncal para el caso 2, escenario 0: penalización intermedia de los transbordos, sistemas de información al usuario actuales y red de rutas activa a febrero de 2020. Entre más ancho y más rojo oscuro se vea un corredor, mayor es su carga, tal como se indica en la tabla de escala. Entre más angosto y azul oscuro se muestre un

corredor, menos carga posee. Como es de esperarse, los tramos más cargados se encuentran en Av. NQS Central y Av. Caracas Central.

Mientras tanto, la Figura 4-3 muestra los usuarios totales por estación en hora punta AM para el caso 2, escenario 0. Entre más grande y más roja se vea una estación, mayor es su número de usuarios, tal como se indica en la tabla de escala. Entre más pequeña y azul se muestre una estación, menos usuarios la utilizan. Además de los portales y las estaciones de Banderas y San Mateo, destacan las estaciones Calle 26, Calle 34, Calle 72, Calle 76, Universidad Nacional, y particularmente, la estación Calle 100, la cual muestra un flujo de usuarios comparable al de cualquier portal.

Finalmente, la Figura 4-4 muestra el tiempo de transbordo total por estación en hora punta AM para el caso 2, escenario 0. Entre más grande y más roja se vea una estación, mayor es la sumatoria de los tiempos de los transbordos que allí se realizan, tal como se indica en la tabla de escala. Entre más pequeña y azul se muestre una estación, menor es el tiempo de los transbordos realizados en ella. Destacan las estaciones Universidad Nacional, CAD, Ricaurte, Comuneros y Tygua - San José.

## 4.2 Análisis del impacto operacional de los conjuntos de lineamientos

En pro de contextualizar al lector, la Tabla 4-2 describe someramente los 6 escenarios de rutas que fueron generados según lo explicado en la sección 3.4.

**Tabla 4-2:** Resumen de los 6 escenarios de redes de rutas generados

Esc.	Lineamientos Geográficos	Lineamientos de Diseño	# Rutas Radiales	# Rutas Diametrales	# Rutas Paradoras	# Rutas Expresas	# Rutas Super Expresas	# Rutas Parciales
0	Actual	Actual	27	38	9	50	6	8
1	Radial	Simple	46	0	9	37	0	0
2	Diametral	Simple	5	20	6	19	0	0
3	Radial	Multicriterio	85	0	9	54	22	14
4	Diametral	Multicriterio	9	45	6	32	16	10
5	Rad/Diam	Multicriterio	34	32	6	40	20	11

En la tabla anterior, los correspondientes servicios de ida y vuelta se cuentan como una sola ruta. El número total de rutas por escenario corresponde a la suma de su número de rutas radiales y diametrales.

Por otra parte, los análisis que se presentan en las dos subsecciones siguientes constituyen la interpretación de datos requerida para identificar los lineamientos con el impacto operacional más positivo.

### 4.2.1 Casos de simulación 1, 2 y 3

Entrando en materia, en esta subsección se hablará de los tres primeros casos de simulación en los cuales se ha modelado la troncal de TransMilenio considerando el estado actual de los Sistemas de Información al Usuario -SIU- disponibles en la vida real: información en plataforma de abordaje sobre los próximos servicios que allí paran. En estos tres escenarios se evaluará un nivel bajo, medio y alto de penalización sobre los transbordos. Ver Figura 4-1 en la sección anterior para consultar los detalles sobre los casos de simulación.

**Tabla 4-3:** Resultados cuantificados del caso 1: penalización baja de los transbordos

Escenario	Tipología (Plazas/Bus)	Flota Total		Tiempo Promedio (minutos)		% Viajes # transbordos						
						0	1	2	3			
Caso	Esc.	80	160	240	Buses	Sillas	Perc.	Viaje	0	1	2	3
1	0	422	678	1245	2345	441040	46,7	41,7	14,1%	38,6%	33,2%	14,0%
1	1	330	554	1321	2205	432080	48,3	41,9	6,2%	21,5%	30,4%	42,0%
1	2	743	620	1369	2732	487200	47,8	41,8	6,6%	21,7%	31,5%	40,1%
1	3	367	644	1164	2175	411760	47,9	41,9	9,6%	31,6%	35,4%	23,5%
1	4	511	766	1157	2434	441120	46,9	41,5	11,6%	36,9%	34,0%	17,5%
1	5	361	617	1249	2227	427360	47,0	41,6	10,5%	37,2%	34,6%	17,7%

La Tabla 4-3 muestra los resultados cuantificados de las simulaciones del caso 1: penalización baja a los transbordos. Estos datos han sido extraídos directamente de la Tabla 4-1, la cual contiene los resultados de todos los casos y escenarios que se simularon. Se tiene entonces para el caso 1:

- La primera conclusión que salta a la vista al interpretar los datos de la Tabla 4-3 es que los conjuntos de rutas que incluyen servicios diametrales resultan en tiempos de viaje ligeramente menores, tanto percibidos como reales. Particularmente, el escenario 0 “Rutas actuales de TransMilenio” entrega el menor tiempo percibido de viaje en promedio para los usuarios. Entre tanto, el escenario 4 entrega el menor tiempo “real” de viaje. La diferencia entre los tiempos percibidos en rutas diametrales y radiales es aproximadamente del 1,6%, y solo del 0,6% para tiempos reales de viaje.
- La segunda conclusión es que, tal como era de esperarse, los escenarios con rutas radiales requieren que los usuarios realicen más transbordos. Por ejemplo, en el escenario 1 apenas el 27,6% de los viajes se realizarían con uno o menos transbordos, y en el escenario 3 este valor llega al 41,1%. En cambio, con rutas diametrales se tiene que para el escenario 4 el porcentaje de viajes que se realizarían con uno o menos transbordos es del 48,5%, mientras que en el escenario 0 se llega hasta 52,8%.
- La tercera conclusión es que el diseño multicriterio aplicado a las rutas de TransMilenio contribuye a disminuir muy levemente los tiempos percibidos de viaje, alrededor de 1,7%. Entre tanto, los tiempos reales de viaje solo se reducen un 0,4%, lo cual es negligible.

**Tabla 4-4:** Resultados cuantificados del caso 2: penalización media de los transbordos

Escenario	Tipología (Plazas/Bus)	Flota Total		Tiempo Promedio (minutos)		% Viajes # transbordos						
		80	160	240	Buses	Sillas	Perc.	Viaje	0	1	2	3
2	0	341	755	1182	2278	431760	48,2	42,2	29,1%	48,7%	19,8%	2,4%
2	1	264	625	1219	2108	413680	50,6	42,3	12,2%	39,5%	36,3%	12,0%
2	2	585	587	1289	2461	450080	49,4	42,2	15,6%	43,0%	32,7%	8,7%
2	3	334	654	1083	2071	391280	50,7	42,5	16,5%	46,5%	31,1%	5,8%
2	4	446	644	1116	2206	406560	48,8	42,0	22,8%	49,9%	24,2%	3,2%
2	5	311	614	1117	2042	391300	49,4	42,3	20,6%	52,9%	23,9%	2,5%

Pasando al caso 2, la Tabla 4-4 muestra los resultados cuantificados de sus simulaciones. Las conclusiones del caso 2 son similares a las del caso 1:

- El diseño diametral de rutas contribuye a obtener los menores tiempos promedio de viaje: nuevamente el escenario 0 es el que presenta el menor tiempo percibido, y el escenario 4 vuelve a tener el menor tiempo real de viaje. En promedio, la aplicación de lineamientos de diseño diametral contribuye a disminuir en un 3,0% los tiempos percibidos -aquí empieza a notarse la penalización a los transbordos-, y solo un 0,7% los tiempos reales de viaje.
- En cuanto a los transbordos, en los escenarios radiales 1 y 3, el 51,7% y el 63,0% de los viajes se realizan con uno o menos transbordos, respectivamente. Esta cifra se eleva a 72,6% para el escenario 4, y 77,8% para el escenario 0, siendo fácil volver a concluir que las rutas diametrales generan menos transbordos que las radiales.
- En lo relativo al diseño multicriterio, no se observa que este conjunto de lineamientos contribuya de manera significativa a disminuir los tiempos promedio de viaje, ni percibidos ni reales, en el segundo caso de simulación.

**Tabla 4-5:** Resultados cuantificados del caso 3: penalización alta de los transbordos

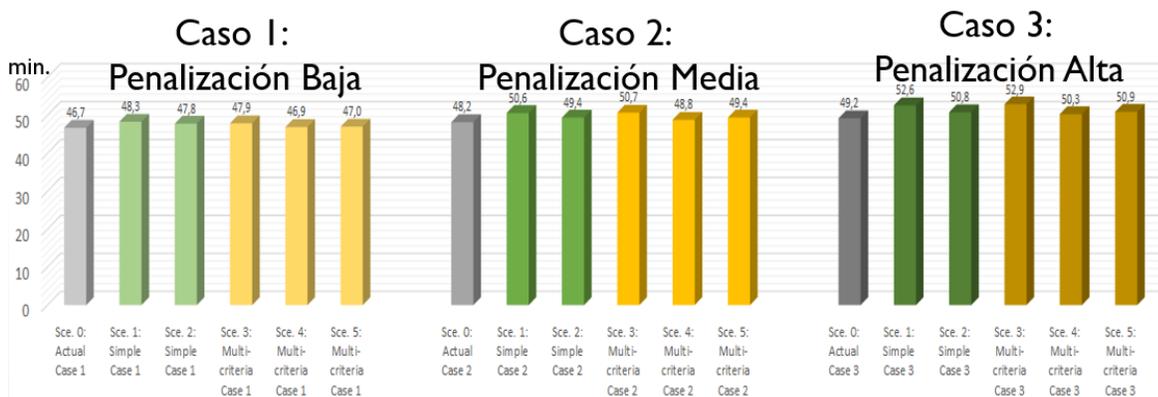
Escenario		Tipología (Plazas/Bus)			Flota Total		Tiempo Promedio (minutos)		% Viajes # transbordos			
Caso	Esc.	80	160	240	Buses	Sillas	Perc.	Viaje	0	1	2	3
3	0	343	683	1223	2249	430240	49,2	42,6	39,5%	48,4%	11,4%	0,7%
3	1	264	624	1190	2078	406560	52,6	42,7	16,5%	48,7%	30,7%	4,0%
3	2	544	574	1254	2372	436320	50,8	42,7	23,0%	52,1%	22,8%	2,1%
3	3	341	555	1117	2013	384160	52,9	43,1	21,4%	57,3%	20,5%	0,8%
3	4	426	642	1070	2138	393600	50,3	42,5	32,4%	54,7%	12,3%	0,5%
3	5	304	614	1128	2046	393280	50,9	42,7	28,0%	59,3%	12,4%	0,3%

Finalmente, la Tabla 4-5 presenta los resultados cuantificados del caso 3:

- Los escenarios 0 y 4 repiten en tener los menores tiempos percibidos y los menores tiempos reales de viaje, respectivamente. En promedio, la aplicación de lineamientos de diseño diametral contribuye a disminuir en un 4,2% los tiempos percibidos -notándose el efecto de la alta penalización a los transbordos-, y solo un 0,8% los tiempos reales de viaje.
- En cuanto a los transbordos, en los escenarios radiales 1 y 3, el 65,2% y el 78,7% de los viajes se realizan con uno o menos transbordos, respectivamente. Esta cifra se eleva a 87,1% para el escenario 4, y 87,9% para el escenario 0. Nuevamente se tiene un caso en el que las rutas diametrales generan menos transbordos que las rutas radiales. Sin embargo, aquí la diferencia es menos notoria, puesto que la alta penalización a los transbordos reduce su incidencia, incluso en los escenarios con rutas radiales.
- En este tercer caso de simulación tampoco se evidencia que el diseño multicriterio permita reducir de forma tangible los tiempos de viaje percibidos o reales, frente al diseño simple de rutas.

Según los resultados ilustrados hasta el momento, se podría pensar que las rutas diametrales contribuyen a disminuir los tiempos de viaje levemente, y por lo tanto, su uso es preferible al uso de rutas radiales. Además, se podría concluir que el efecto negligible sobre los tiempos de viaje del diseño multicriterio – ver Figura 4-5 – no justifica la implementación de sistemas complejos de redes de rutas.

**Figura 4-5:** Tiempos de viaje percibidos, casos 1, 2 y 3.



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, la historia puede cambiar si se tiene en cuenta un parámetro adicional:  $N_{pl}$ , la flota requerida expresada en el número de plazas o sillas totales, tal como se definió en la ecuación (3.3) de la subsección 3.1.2. A pesar de lo expresado en la sección 3.1, en cuanto a que la función objetivo para la modelación sería el costo generalizado para el usuario, entendido como el tiempo de viaje percibido, la evaluación de la variable  $N_{pl}$  está justificada por tres hechos:

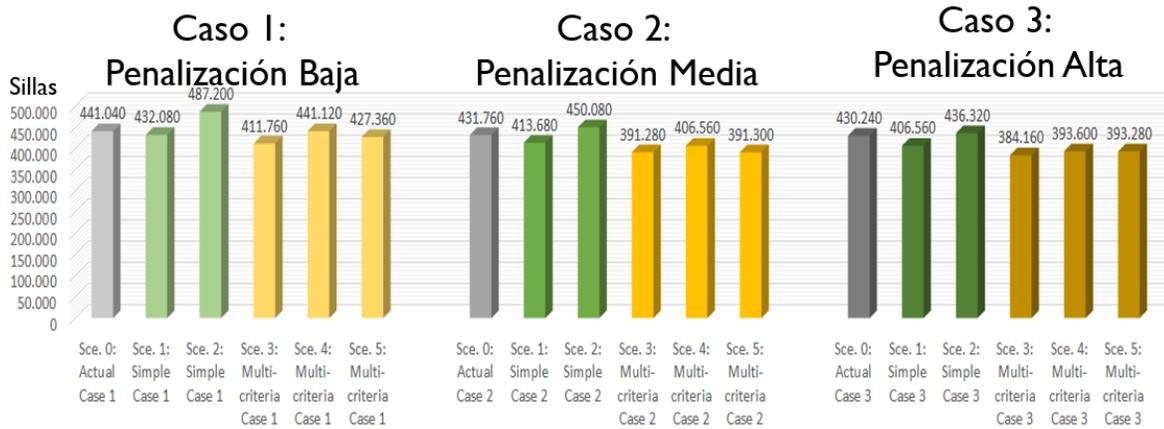
- Tal como se ha visto, el impacto de los distintos conjuntos de lineamientos en los tiempos de viaje percibidos y “reales” es, en el mejor de los casos, leve. Por lo tanto, es conveniente tener una variable adicional de desempate.
- Si bien, tal como se expresó en la subsección 3.1.2. “Durante las horas punta, se debe programar toda la flota disponible y no se deben escatimar recursos para cubrir la demanda de pasajeros”, también es deseable que se requiera menos flota para cubrir la demanda total. Aparte del posible efecto económico, un requerimiento menor de flota podría contribuir a que si se opera con una cantidad de vehículos superior a este requerimiento mínimo, haya una mayor comodidad para los pasajeros al interior de las unidades de transporte. Es decir, menos pasajeros por metro cuadrado en los buses durante la hora punta.
- Adicionalmente, el requerir una menor cantidad de flota también puede tener un efecto en las velocidades reales de los buses en la red troncal: entre menos buses circulando, menor congestión en la troncal y por ende, mayores velocidades y menores tiempos de viaje.

Con lo anterior en mente, se procede a analizar el efecto de los diferentes conjuntos de lineamientos sobre la flota mínima requerida:

- En el caso 1, se observa en la Tabla 4-3 que el escenario con la menor flota es el 3, con un requerimiento 6.6% menor que lo obtenido para el escenario de rutas actuales en la modelación -29.280 plazas menos-.

- En el caso 2, Tabla 4-4, nuevamente el escenario con la menor flota es el 3: un ahorro de flota del 9.4% respecto a lo obtenido para el escenario de rutas actuales en la modelación -40.480 plazas menos-.
- En el caso 3, Tabla 4-5, el escenario 3 repite al tener la menor flota requerida: un ahorro de flota del 10.7% respecto a lo obtenido para el escenario de rutas actuales en la modelación -46.080 plazas menos-.

**Figura 4-6:** Flota mínima requerida, casos 1, 2 y 3.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-6 representa gráficamente lo que se acaba de enunciar. Puede verse entonces que, sin importar el grado de penalización de los transbordos, el escenario 3 “rutas radiales + diseño multicriterio” es el que permite obtener el menor requerimiento de flota.

Resumiendo, si se trata de comparar el efecto de las diferentes filosofías en la flota requerida, es posible decir que:

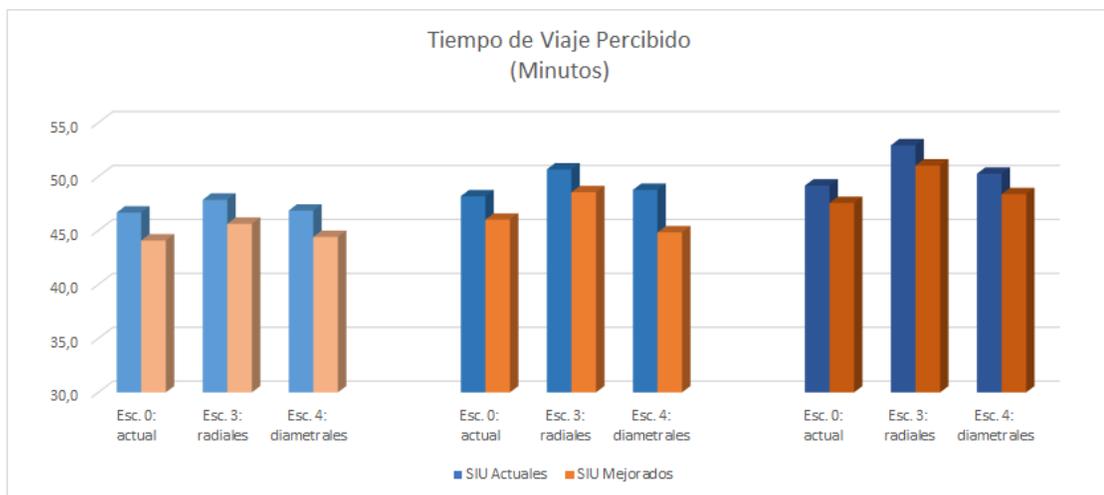
- El diseño de rutas radiales permite un ahorro de flota de 10,0%, 6,4% y 5,0% en los casos de simulación 1, 2 y 3, respectivamente. Esto frente al diseño con rutas diametrales.
- El diseño multicriterio permite un ahorro de flota de 7,2%, 8,2% y 7,4% en los casos de simulación 1, 2 y 3, respectivamente. Esto frente al diseño simple.

- La combinación de lineamientos de diseño radial y diseño multicriterio permite un ahorro de flota de 15,5%, 13,1% y 12,0% en los casos de simulación 1, 2 y 3, respectivamente. Esto frente a la combinación de diseño diametral y diseño simple.
- La combinación de lineamientos de diseño radial y multicriterio permite un ahorro de flota de 6,7%, 3,8% y 2,4% en los casos de simulación 1, 2 y 3, respectivamente. Esto frente a la combinación de diseño diametral y diseño multicriterio.

### 4.2.2 Casos de simulación 4, 5 y 6

Para finalizar este capítulo, en la presente subsección se analizarán los resultados de los casos 4, 5 y 6. Aquí el interés radica en conocer el efecto que la implementación de Sistemas de Información al Usuario -SIU- mejorados tendría sobre los escenarios simulados en los casos 1, 2 y 3. Para tal fin, se presentan las siguientes figuras, las cuales muestran la comparación entre el antes y el después de las variables de interés:

**Figura 4-7:** Tiempos de viaje percibidos: SIU actuales vs. SIU mejorados

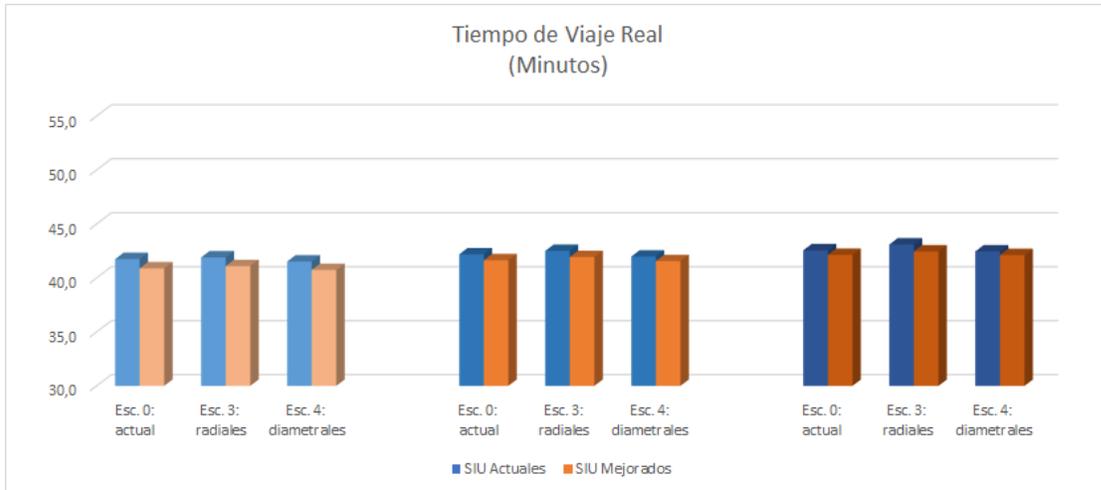


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4-7 muestra la variación de los tiempos de viaje percibidos antes y después de mejorar los SIU. En su orden, la figura muestra los casos de baja -casos 1 y 4-, media -

casos 2 y 5- y alta -casos 3 y 6- penalización de los transbordos. Es posible observar que en cada caso la mejora promedio ha sido de 5,1%, 5,6% y 3,5%, respectivamente.

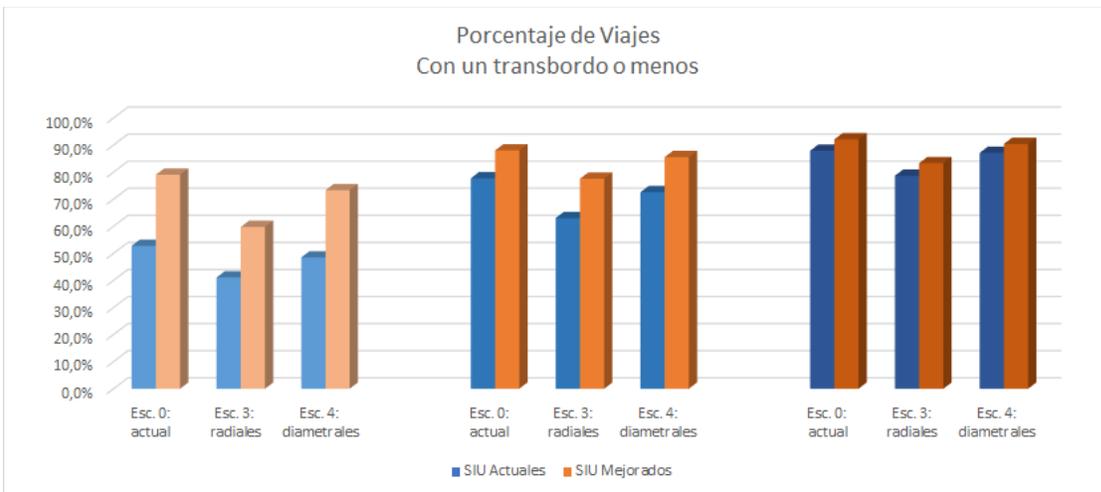
**Figura 4-8:** Tiempos de viaje “reales”: SIU actuales vs. SIU mejorados



Fuente: Elaboración propia.

Entre tanto, la Figura 4-8 muestra la variación de los tiempos de viaje “reales” antes y después de mejorar los SIU. En esta ocasión, la mejora promedio ha sido de 1,9%, 1,2% y 1,1%, para los casos de baja, media y alta penalización de los transbordos.

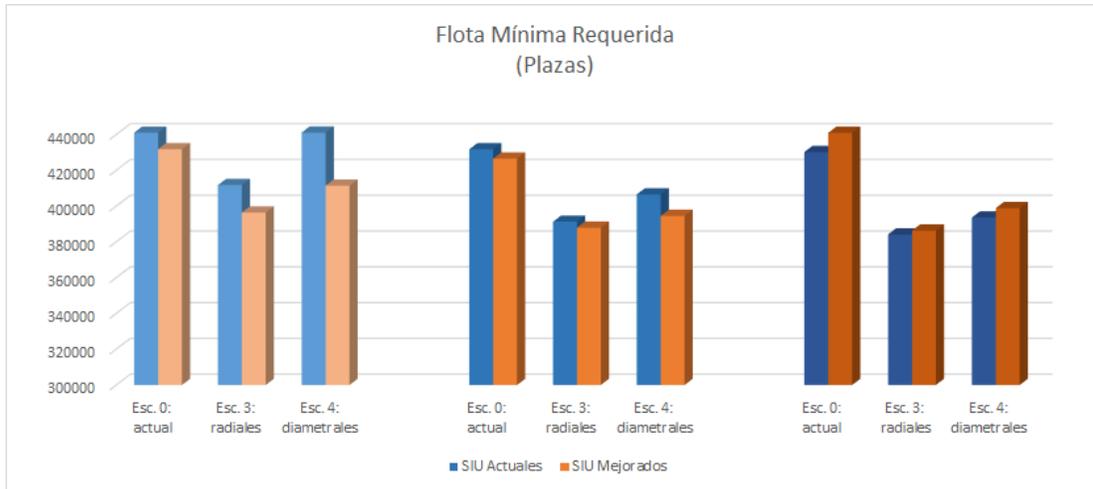
**Figura 4-9:** Viajes con uno o menos transbordos: SIU actuales vs. SIU mejorados



Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, la Figura 4-9 muestra la variación en el porcentaje de viajes que es posible realizar con uno o menos transbordos, antes y después de mejorar los SIU. Para los casos modelados la mejora promedio ha sido de 48,8% -con baja penalización de los transbordos-, 18,0% -con penalización media- y 4,8% -con penalización alta-.

**Figura 4-10:** Flota mínima requerida: SIU actuales vs. SIU mejorados



Fuente: Elaboración propia.

La última gráfica de esta tanda, la Figura 4-10, muestra la variación en la flota requerida en cada uno de los casos. Para el caso de baja penalización de los transbordos se observa una reducción promedio en la flota requerida de 4,2%, mientras que para el caso de penalización media la reducción es de 1.7%. Sin embargo, para el escenario de alta penalización de los transbordos se puede apreciar un comportamiento atípico, en el cual la introducción de SIU mejorados podría aumentar en un 1,5% la flota mínima requerida. Este resultado no estaba dentro de lo esperado. Se especula entonces que al penalizar demasiado los transbordos, las decisiones de viaje de los usuarios podrían no ser optimas, a pesar de disponer de una información completa sobre los servicios operativos.

Finalizando esta subsección, y según los hallazgos que se acaban de describir, se procede a afirmar lo siguiente:

- Los tiempos de viaje percibidos mejorarían apreciablemente, hasta 5,6%, con la introducción de SIU mejorados.

- Los tiempos de viaje “reales” mejorarían muy levemente, hasta 1,9%. Sin embargo, este porcentaje se podría considerar dentro del borde de lo negligible.
- Si el sistema de transporte permitiera realizar transbordos con una penalización media o baja, la introducción de SIU mejorados podría contribuir a que una mayor proporción de los viajes, entre 18,0% y 48,8% más, se realizaran utilizando uno o menos transbordos.
- Si el sistema de transporte fuera amigable con los transbordos, la introducción de SIU mejorados podría disminuir hasta en un 4,2% el requerimiento mínimo de flota. Este porcentaje no es nada despreciable teniendo en cuenta las magnitudes de las que se está hablando: desde 4.000 hasta 30.000 sillas ahorradas, según el escenario exacto a considerar.

### **4.3 Lineamientos generales para el diseño de la red de rutas troncales en el SITP**

Esta sección es de resaltar dentro del presente documento, ya que es aquí donde se dará alcance al objetivo principal de la investigación. Por lo tanto, se recomienda su lectura atenta al lector que esté interesado en conocer los lineamientos específicos que aquí se generan para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP en Bogotá.

#### **4.3.1 Lineamientos sobre los trazados geográficos**

En primer lugar, se recuerda al lector que en esta investigación se han planteado y desarrollado unos **procesos heurísticos para el diseño sistemático de los trazados geográficos de las rutas troncales del SITP**, según distintos lineamientos. Estos procesos tuvieron en consideración algunas de las características de los viajes realizados por los usuarios: orígenes, destinos, volúmenes de pasajeros y longitud de los recorridos, realizando análisis desagregados por corredor troncal, portales y estaciones intermedias. De este modo fue posible encontrar soluciones para atender adecuada y eficientemente los deseos de viaje en las distintas zonas de la ciudad. Específicamente, se hace referencia a los escenarios de rutas 3, 4 y 5, cuyos indicadores pueden consultarse en la Tabla 4-1.

Además, el hecho de que la modelación muestre que algunos de los escenarios generados podrían tener un mejor comportamiento potencial que la red de rutas actual es una evidencia de que los procesos heurísticos planteados son válidos, funcionales y útiles. Para más detalles sobre estos procesos, por favor remitirse a la sección 3.4.

Ahora bien, tal como se ha venido planteando a lo largo del presente, existen dos filosofías relacionadas directamente con los trazados geográficos de las rutas: diseño radial y diseño diametral, cuyas directrices pueden consultarse en las subsecciones 2.2.3 y 2.2.4, respectivamente. Es momento de definir cuál filosofía podría servir mejor a las necesidades de los usuarios en la ciudad de Bogotá:

**Con la infraestructura actual de la troncal de TransMilenio, hoy en día se recomienda mantener una red de rutas en la que predomine el diseño diametral.**

Como ventaja, los tiempos de viaje para los usuarios son levemente menores. Como desventaja, se requiere más flota para cubrir la demanda de pasajeros.

Las razones que sustentan la afirmación realizada son dos:

- La red troncal del SITP no cuenta con las estaciones centrales necesarias para implementar rutas radiales de manera generalizada. Este tema se tratará con mayor detalle en la siguiente subsección.
- Los retornos operacionales existentes no tienen la capacidad suficiente para soportar el número de buses que girarían de regreso en puntos céntricos de la ciudad, en el caso de implementar rutas radiales generalizadamente.

Para ilustrar el segundo punto se puede tomar como referencia la modelación del caso 2, escenario de rutas 3: penalización media de los transbordos, y rutas radiales con diseño multicriterio. La simulación indica que durante la hora punta AM 1.509 buses tendrían que hacer su retorno en algún punto del centro ampliado de la ciudad. No obstante, actualmente se podrían usar a lo sumo 10 retornos operacionales para tal fin. Esto implicaría que, en promedio, cada retorno tendría que soportar 150 buses por hora, lo cual está por encima de su capacidad actual. Incluso, algunos puntos neurálgicos, tales

como el retorno en la estación de Héroes, el interconector de la Calle 80 con NQS, o el llamado Retorno de la Mariposa, tendrían que atender más de 200 buses en una hora, lo que produciría largas filas de articulados tratando de girar y un posible colapso de la red troncal.

Debe aclararse que el lineamiento que se acaba de enunciar aplica para el corto plazo, para la inmediatez. Sin embargo, para el mediano plazo la recomendación es otra:

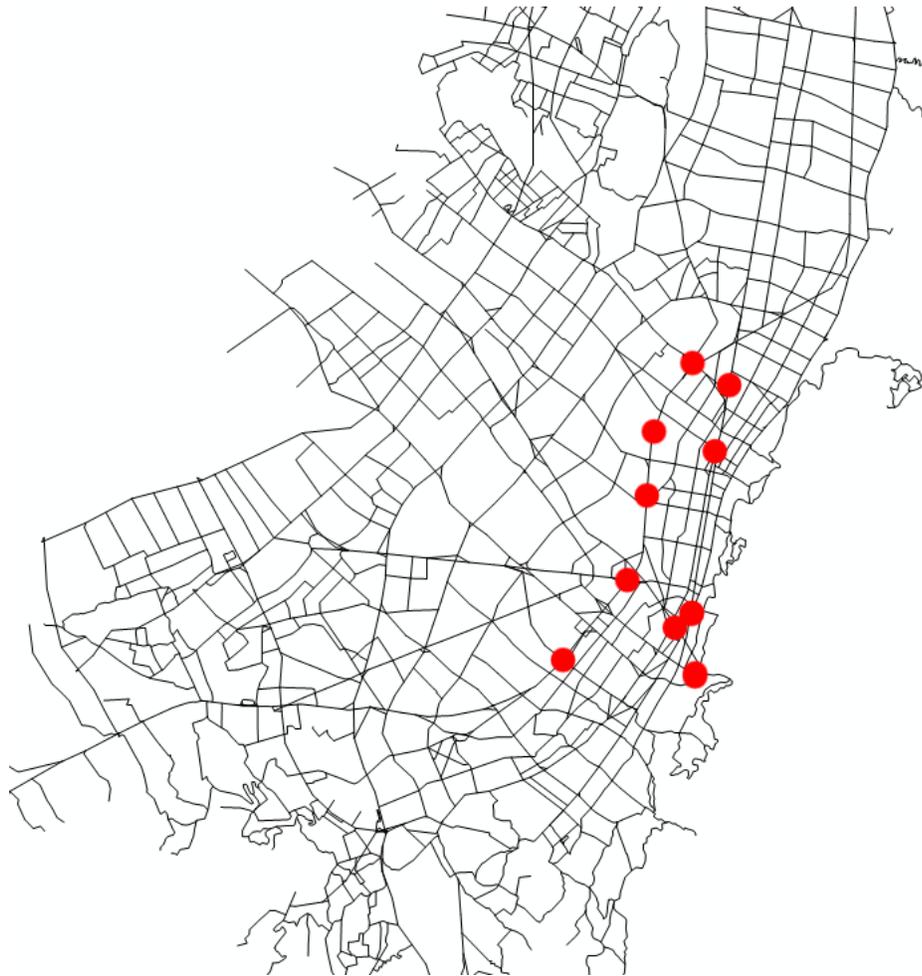
**El componente troncal del SITP debe empezar a migrar, en el mediano plazo, hacia una red de rutas radiales que permita disminuir la flota mínima requerida para cubrir la demanda.**

Lo anterior llevará a tener una mejor planeación de los servicios, con mejores intervalos de paso y por lo tanto, menos pasajeros por metro cuadrado dentro de los buses. Del mismo modo, al tener menos buses circulando será posible mejorar la velocidad de operación del sistema, disminuyendo así los tiempos de viaje.

Sin embargo, para poder implementar este nuevo paradigma de diseño es fundamental que se concreten dos acciones:

- La construcción de estaciones centrales en ciertos puntos neurálgicos, tal como se explicará en la siguiente subsección.
- La ampliación o creación de nuevos de retornos operacionales en las cercanías de los puntos rojos mostrados en la Figura 4-11. Esto debe ir de la mano con el diseño de estaciones centrales que tengan el tamaño necesario para facilitar el giro de los buses al momento de retornar.

**Figura 4-11:** Ubicación de los retornos operacionales a priorizar en el centro ampliado.



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Para finalizar lo relativo a los lineamientos sobre trazados geográficos, es necesario complementar diciendo que el diseño multicriterio también tiene cierta incidencia aquí:

**En el corto plazo se recomienda una implementación más amplia de rutas parciales que inicien y terminen en estaciones intermedias distintas a los portales.**

Por un lado, el diseño de rutas parciales hace parte integral de los lineamientos de diseño multicriterio, los cuales permiten reducir la flota mínima requerida. En el caso específico de las rutas parciales, estas permiten atender una porción de la demanda realizando recorridos más cortos. Por otro lado, el problema que existe en algunas estaciones intermedias para acceder a los buses en hora punta AM -los buses ya vienen

al tope de su capacidad desde los portales- podría ser aliviado mediante la implementación de este tipo de servicios. Según los datos del modelo de transporte, las estaciones que requieren con cierta urgencia la implementación de más servicios parciales son:

- Toberín
- Alcalá
- Banderas
- San Mateo
- Gral. Santander
- Calle 40 Sur

#### **4.3.2 Lineamientos sobre los puntos de parada**

Para empezar, se recuerda al lector que en la sección 3.4 se han presentado los **procesos heurísticos desarrollados para asignar sistemáticamente los puntos de parada a las rutas**. Estos procesos no han tenido como objetivo buscar un óptimo local en la asignación de paradas -problema que computacionalmente es muy complejo-, pero sí brindan una solución funcional que ha probado ser eficiente y útil para abordar el problema en los escenarios de redes de rutas generados con distintos lineamientos.

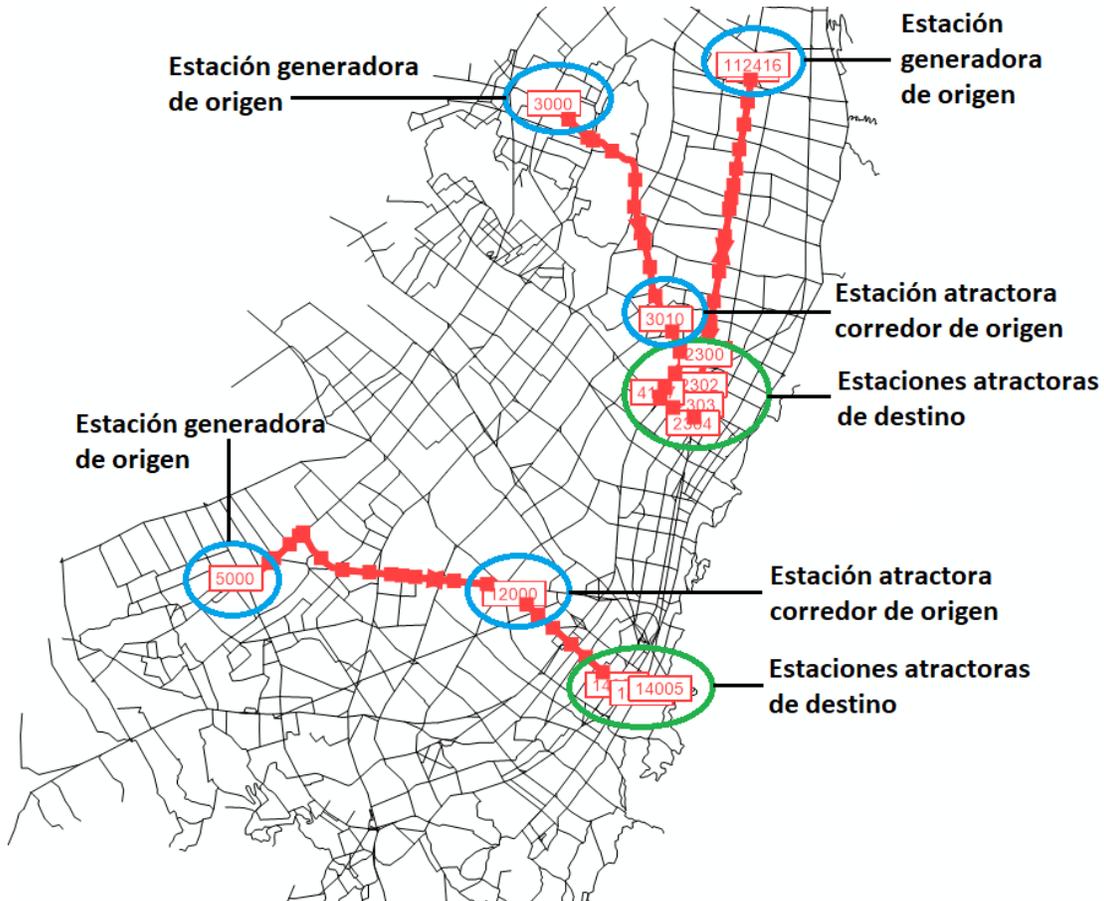
Por otra parte, las filosofías de diseño simple y diseño multicriterio están relacionadas con la estructura de los puntos de parada en las rutas. Particularmente, el diseño multicriterio ha demostrado ser útil a la hora de disminuir la flota requerida. Esto da lugar a las siguientes recomendaciones, aplicables tanto a rutas radiales como a rutas diametrales:

**En el corto plazo se recomienda ampliar la implementación de rutas superexpresas, tanto desde los portales como desde las estaciones intermedias con más demanda.**

Si bien es cierto que la red actual de rutas cuenta con algunos servicios que pueden calificarse como superexpresos, se sugiere reforzar esta estrategia de modo que cada portal o estación intermedia cuente con dos o más rutas de este tipo. Los datos de los

escenarios simulados sugieren que hasta un 25% de los usuarios podrían hacer uso de los servicios superexpresos en alguna de sus etapas de viaje.

**Figura 4-12:** Ejemplo de dos servicios superexpresos del escenario 4.



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Los escenarios de rutas 3, 4 y 5 del modelo de transporte contienen implementaciones concretas de servicios superexpresos, garantizándose para ellos un nivel de demanda mínimo que permitiría justificar su puesta en marcha. Como ejemplo, la Figura 4-12, en la página anterior, muestra el detalle de dos de estos servicios en el escenario 4. Los superexpresos se caracterizan por atender máximo dos estaciones generadoras de viajes en su corredor de origen, y llevar a los pasajeros a las estaciones más cargadas de su zona de destino. Es posible agregarles una parada en una estación atractora de su propio corredor para facilitar el intercambio de pasajeros con otros servicios. Si el lector

se encuentra interesado, puede consultar la definición formal de estación generadora o atractora de un corredor de origen en la sección 3.4.1.

Otra recomendación que se genera de los lineamientos de diseño multicriterio es la siguiente:

**En el corto plazo, se sugiere implementar rutas con paradas asimétricas para sus sentidos de ida y vuelta.**

Aunque para los usuarios es más fácil entender un sistema en el que sus rutas tengan las mismas paradas en la ida y la vuelta, los datos de las simulaciones han mostrado que es posible mejorar los indicadores modelados, en parte, gracias al efecto de los servicios asimétricos. En estos servicios, los buses paran en ciertas estaciones asignadas en su sentido más cargado. No obstante, en el sentido menos cargado no necesariamente deben parar en las mismas estaciones. Esto dependerá de los deseos de viaje de los usuarios. Los procesos heurísticos de la subsección 3.4.5 establecieron las pautas para escoger estas paradas asimétricas en el caso de un diseño multicriterio para la hora punta AM.

Este lineamiento cobra más relevancia si se diseñan servicios asimétricos según la hora del día. Las paradas de una ruta en la hora punta AM no tienen porqué ser las mismas que en la hora punta PM, los deseos de viaje no necesariamente son simétricos. Lastimosamente, la modelación de la hora punta PM está fuera del alcance de este trabajo, pero vale la pena dejar nota del potencial de la recomendación dada.

Una tercera recomendación derivada de las modelaciones realizadas es la siguiente:

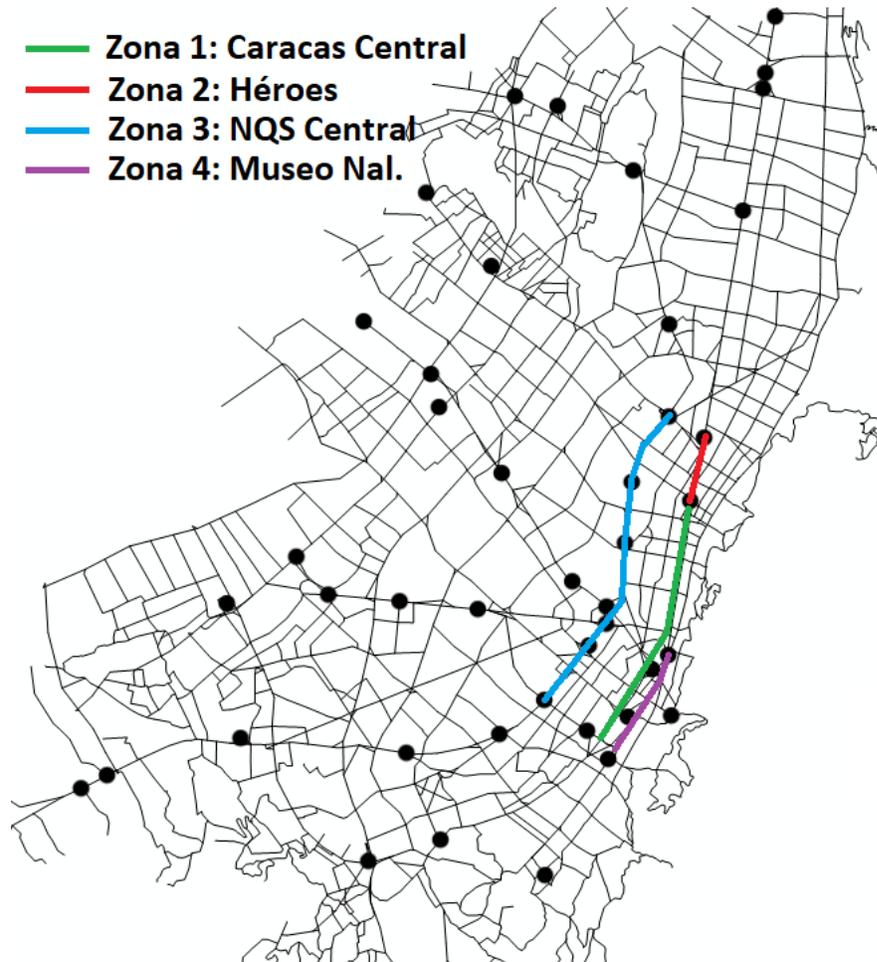
**En el corto plazo, sería conveniente ensayar con rutas cuyas paradas estén asignadas para atender diferentes zonas de destino en los corredores centrales.**

Lo anterior permitiría distribuir la demanda de pasajeros según sus zonas de destino, de modo que el perfil de carga de las rutas tienda a ser más plano, contribuyendo a disminuir la flota requerida. Para esto se sugiere considerar las zonas centrales de destino con las cuales se diseñaron las redes de rutas de los escenarios. Para facilidad

del lector, se repite la Figura 3-17, la cual ilustró las zonas de destino resultantes después de analizar la matriz de viajes -ver subsecciones 3.3.3 y 3.4.1-.

Como aclaración adicional, la estación Calle 100, una de las más importantes del sistema, no está incluida dentro de las zonas de destino de los corredores centrales por dos razones. Por un lado, esta estación pertenece al corredor de la Autopista Norte, y por lo tanto, se le ha tratado como una estación atractora de viajes en este corredor. Por otro lado, las estaciones de las zonas de destino necesitan contar con un retorno operacional cercano para que los buses puedan girar en el caso de tener rutas radiales. Desafortunadamente, no existe un retorno en las inmediaciones de la estación Calle 100.

**Figura 4-13:** Zonas de destino y retornos operativos de la red troncal de TransMilenio.



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Lo que se acaba de expresar permite introducir la que tal vez sea la recomendación más importante en lo relativo a puntos de parada y rutas radiales:

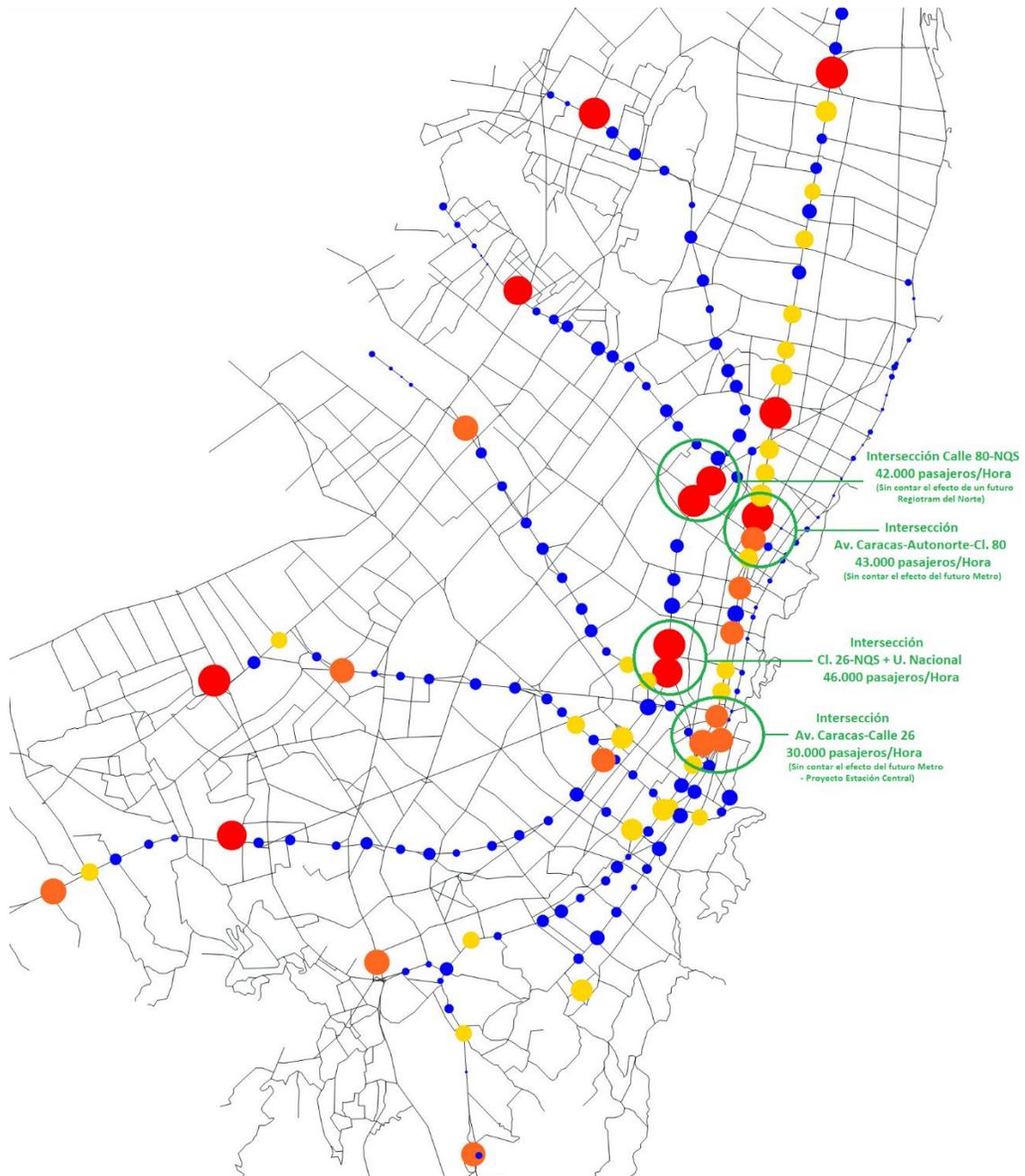
**En el mediano y largo plazo, es extremadamente importante que se implementen estaciones centrales en ciertos puntos geográficos ya identificados. Estas estaciones deben tener la capacidad suficiente para atender a los pasajeros que allí hagan transbordo y permitir el retorno operacional de los buses en el caso de implementar rutas radiales.**

Tomando en consideración que en la subsección anterior se planteó que el sistema TransMilenio debería migrar hacia rutas radiales en el mediano plazo, resulta fundamental que se construyan las estaciones centrales requeridas para tal fin. Estas estaciones deben tener el tamaño suficiente para permitir e incentivar la circulación de decenas de miles de usuarios durante la hora punta. Para tal fin será indispensable que sus espacios sean acogedores; que cuenten con zonas comerciales atractivas; pasillos y plataformas de abordaje amplios; y una seguridad reforzada que le permita a los usuarios hacer uso de ellas, sin temor, a cualquier hora del día o la noche. La estación central La Cisterna, en Santiago de Chile, es un buen ejemplo de cómo deben construirse este tipo de lugares, en pro del bienestar de los usuarios -ver subsección 1.2.1-. Adicionalmente, no sobra decir que en Bogotá ya existe una estación central: Museo Nacional. Sin embargo, esta estación aún no desarrolla todo su potencial, puesto que para el año 2020 no existe un corredor de transporte masivo sobre la Cr. 7 hacia el norte.

Para finalizar con esta recomendación, el investigador se permite sugerir los lugares donde deberían ubicarse estas estaciones centrales -Figura 4-14-, junto con una cuantificación de corto plazo del número de pasajeros que harían uso de ellas durante la hora punta AM. Las estaciones centrales que se plantean deben tener la capacidad de permitir el retorno operacional de al menos 250 buses durante una hora.

Es notable que uno de los sitios sugeridos coincide con la ubicación del proyecto “Estación Central” [88], el cual se contempla en conjunto con las obras de la Primera Línea del Metro de Bogotá, en las inmediaciones de la Av. Caracas con Calle 26.

**Figura 4-14:** Ubicación de las estaciones centrales recomendadas.



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

### 4.3.3 Lineamientos sobre las frecuencias

En la sección 4.2.2 se presentó una **Metodología iterativa para la asignación de viajes**, siendo una de las salidas de este ejercicio la determinación de las frecuencias para los servicios en cada escenario. Esta metodología fue diseñada tomando elementos

clásicos del modelo de 4 pasos, pero adaptando el proceso a las características del sistema TransMilenio. Además, tal como se demostró en la sección arriba citada, ha sido posible hallar soluciones convergentes para el problema de determinación de las frecuencias.

Por lo tanto, la metodología iterativa planteada puede ser considerada como un aporte dentro de los lineamientos relativos a las frecuencias de las rutas. Esto significa que el proceso en sí puede ser replicado para determinar las frecuencias que se adapten a otras condiciones de oferta y demanda, i.e. otros conjuntos de rutas, matrices de viaje de otras franjas horarias o una nueva distribución de las tipologías de los buses -duales, articulados, biarticulados-.

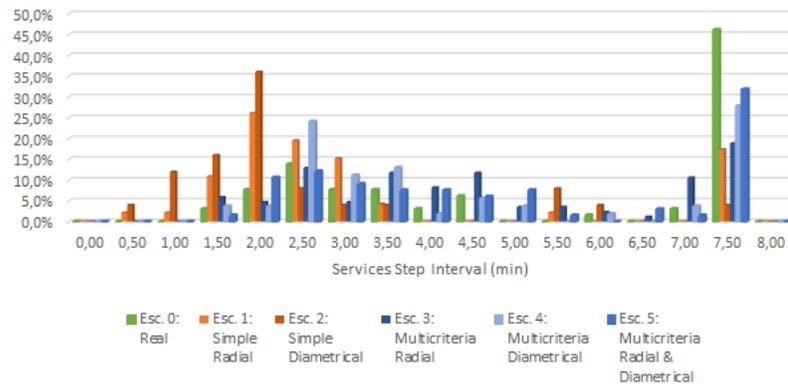
Ahora, para ilustrar los efectos de las distintas filosofías sobre las frecuencias, se presenta la Figura 4-15. Allí se muestra la distribución porcentual de los intervalos de paso que se cuantificaron en cada escenario. El escenario actual corresponde a las barras verdes; los escenarios 1 y 2 con enfoque de diseño simple corresponden a las barras con tonos naranja; y los escenarios 3, 4 y 5 con enfoque de diseño multicriterio corresponden a las barras con tonos azules.

Es posible inferir de la figura que el diseño simple -barras naranja- lleva a tener intervalos de paso muy cortos -hasta 30 segundos- que no son prácticos en una operación real: tener 120 unidades de transporte de la misma ruta pasando en una hora implicaría la formación de convoyes y podría resultar en largas filas de buses esperando su turno para detenerse en una estación. Incluso, un intervalo de paso menor a 2 minutos puede no resultar práctico en la vida real. Esto lleva a formular la siguiente sugerencia:

**No se recomienda implementar un sistema de rutas demasiado simple en el componente troncal del SITP, puesto que esto implicaría intervalos de paso muy cortos para los servicios, con sus consecuentes efectos en la formación de convoyes y largas filas de buses en las estaciones.**

Tal como se observa en la Figura 4-15, hasta un 68% de los servicios podrían requerir intervalos de paso inferiores a 2 minutos en el caso de implementarse una red de rutas muy simple.

**Figura 4-15:** Distribución Porcentual de los intervalos de paso de las rutas por escenario



Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, es preciso decir que:

**Se recomienda la implementación de redes de rutas diseñadas con lineamientos multicriterio, de modo que los intervalos de paso se encuentren dentro de unos límites razonables para la operación real de un sistema BRT como TransMilenio.**

La Figura 4-15 permite ver que los escenarios con redes multicriterio -barras azules- presentan una distribución de intervalos de paso más acorde a las necesidades de la operación real y los usuarios: intervalos de paso entre 2 y 7.5 minutos mayoritariamente. Se disminuye así la probabilidad de que se generen largas filas de buses en las estaciones, al tiempo que se mantienen los niveles de servicio ante el usuario.

#### 4.4 Consideraciones sobre el uso de Sistemas de Información al Usuario

Una de las principales conclusiones de la sección anterior es que es preferible diseñar redes de rutas con el enfoque multicriterio, aunque esto resultaría en unos esquemas de servicios más complejos para los usuarios. Para solventar esta desventaja se plantea el siguiente lineamiento adicional:

**Es urgente que se implementen SIU mejorados que permitan a los usuarios obtener información sobre los servicios que operan en todas las plataformas y estaciones. En la práctica, esto equivale a una aplicación para usuarios que**

**contenga la información en tiempo real del sistema troncal y un planificador de viajes que optimice la toma de decisiones.**

Es conveniente recordar al lector que para llegar a esta conclusión se han considerado tres casos de simulación en los cuales se asumió que existirían SIU mejorados. Apoyándose con el submodelo “Elección para decisiones de abordaje” del software PTV-Visum, fue posible emular el comportamiento de los usuarios en el caso de tener información muy completa a la mano. Para más detalles, consultar la sección 4.1.

Con el objetivo de sustentar la sugerencia que se plantea sobre los SIU, es necesario decir que la implementación de una aplicación de usuario, con planificador de viajes en tiempo real, impactaría de manera apreciable los tiempos de viaje percibidos -hasta 5,6% de disminución- y la flota mínima requerida para cubrir la demanda -hasta 4,2% de disminución-. Sin embargo, también es necesario decir que los tiempos “reales” de viaje no se verían disminuidos de forma significativa.

Finalmente, se debe mencionar que las mejoras en los indicadores proporcionadas por SIU mejorados son más notorias cuando el sistema de transporte es amigable con los transbordos. Esto va de la mano con lo dicho en la sección anterior, acerca de que las estaciones centrales deben incentivar y facilitar el transbordo mediante el ofrecimiento de unas condiciones adecuadas para la permanencia y circulación de los usuarios.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

El camino recorrido hasta ahora ha incluido una primera etapa para la elaboración de un estado del arte compuesto por una revisión de literatura sobre el diseño de rutas en sistemas de transporte público, un estudio de dos casos internacionales, y la realización de entrevistas a expertos nacionales e internacionales -Capítulo 1-. Sobre esta base se han enunciado los principios rectores para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP, y de allí se han derivado 4 filosofías que, al combinarse de diversas formas, han producido 5 conjuntos de lineamientos para ser puestos a prueba -Capítulo 2-.

En una segunda fase se ha construido una metodología para cuantificar el impacto operacional de estos conjuntos de lineamientos. Esta incluyó la definición de variables operacionales y funciones objetivo para un modelo de transporte de la red troncal, el cual fue creado en el software PTV-Visum. También se reconstruyó la matriz origen-destino de viajes internos de la troncal a febrero de 2020. Esta matriz fue calculada ejecutando los submodelos de generación y atracción de viajes, y distribución por Fratar. Adicionalmente, se generaron escenarios de redes de rutas, correspondientes a los conjuntos de lineamientos, mediante el desarrollo de procesos heurísticos. También se ha incluido una metodología iterativa para el submodelo de asignación de viajes. -Capítulo 3-.

En la tercera fase se ha cuantificado el impacto operacional de los conjuntos de lineamientos. Cada uno de los 6 escenarios de rutas fue utilizado en hasta 6 casos de simulación, obteniéndose un total de 27 modelaciones, cuyos resultados han sido analizados, en pro de generar y soportar los lineamientos ya enunciados -Capítulo 4-.

Finalmente, en este capítulo se presentarán las conclusiones y recomendaciones generadas de la investigación realizada. Adicionalmente, se hablará sobre los alcances y limitaciones, incluyendo una mención sobre algunos temas abiertos para el futuro.

## 5.1 Conclusiones

Con respecto a los tiempos percibidos de viaje, se ha demostrado que el enfoque de diseño multicriterio no presenta ventajas significativas sobre el enfoque de diseño simple. Sin embargo, si se considera la flota mínima requerida, la diferencia es más notable, ya que el enfoque de multicriterio logra un valioso ahorro de sillas. En comparación con el escenario de la red de rutas reales del BRT de Bogotá, el enfoque multicriterio da como resultado tiempos percibidos de viaje ligeramente más altos. Sin embargo, en términos de los tiempos de viaje netos (sin coeficientes de ponderación del tiempo), la diferencia es insignificante. En cuanto a la flota requerida, el enfoque multicriterio permitiría, según las simulaciones, ahorros significativos en el número de asientos en comparación con las rutas reales. Por lo anterior, para el diseño de rutas en el componente troncal del SITP se recomienda el enfoque multicriterio descrito en este trabajo.

Por el lado de la comparación entre rutas radiales multicriterio vs. rutas diametrales multicriterio, estas últimas proporcionan una ligera mejora en los tiempos percibidos de viaje en comparación con sus equivalentes radiales. Sin embargo, la red de rutas reales tendría tiempos de viaje percibidos ligeramente más cortos que los de la red de rutas diametrales multicriterio. En cualquier caso, si se comparan los tiempos netos de viaje, de nuevo la diferencia entre los escenarios de la red de rutas reales, rutas radiales multicriterio y rutas diametrales multicriterio es insignificante. Además, si se considera la flota mínima requerida, las rutas radiales con enfoque multicriterio ofrecen un ahorro de flota del 8,9% respecto a las rutas reales de TransMilenio, y del 4,4% respecto al escenario de rutas diametrales multicriterio.

Considerando lo anterior, la principal conclusión es que el escenario de rutas radiales multicriterio ofrecería la mejor respuesta a las necesidades de TransMilenio. Sin embargo, hoy en día no sería posible implementar estas rutas radiales sin antes construir cuatro estaciones centrales de intercambio que permitan atender flujos más altos de

transbordos, y ofrezcan retornos operacionales adecuados para los buses que concluyen sus recorridos radiales en el centro ampliado de la ciudad.

## 5.2 Resumen tabular de los lineamientos para el diseño de la red de rutas en el componente troncal del SITP

Como parte de las conclusiones, se presenta un resumen de los lineamientos específicos generados para el diseño de rutas en el BRT de Bogotá. Estos lineamientos reflejan las recomendaciones emanadas de la presente investigación.

**Tabla 5-1:** Lineamientos generales para el diseño de rutas troncales en el SITP

Lineamiento	Horizonte	Impacto en los usuarios	Impacto en el ente gestor	Fuente
1. Procesos heurísticos para el diseño sistemático de los trazados geográficos de las rutas troncales del SITP	Mediano plazo	Atención eficiente de los deseos de viaje	Una metodología alternativa de diseño	Elaboración propia
2. Con la infraestructura actual de la troncal de TransMilenio, hoy en día se recomienda mantener una red de rutas en la que predomine el diseño diametral	Corto plazo	Conservación de los niveles de servicio percibidos	Información relevante para el diseño de rutas	Literatura + Elaboración propia
3. El componente troncal del SITP debe empezar a migrar, en el mediano plazo, hacia una red de rutas radiales que permita disminuir la flota mínima requerida para cubrir la demanda	Mediano plazo	Mejora en los tiempos de acceso, los intervalos de paso y la comodidad	Reducción en la flota mínima requerida para operar	Literatura - Elaboración propia
4. En el corto plazo se recomienda una implementación más amplia de rutas parciales que inicien y terminen en estaciones intermedias distintas a los portales	Corto plazo	Mejora en los tiempos de acceso y los intervalos de paso percibidos	Ampliación y potenciación de un enfoque algo explorado	Entrevistas a expertos
5. Procesos heurísticos desarrollados para asignar sistemáticamente los puntos de parada a las rutas	Corto - mediano plazo	Atención eficiente de los deseos de viaje	Una metodología alternativa de diseño	Elaboración propia

6. En el corto plazo se recomienda ampliar la implementación de rutas superexpresas, tanto desde los portales como desde las estaciones intermedias con más demanda.	Corto plazo	Mejoras en los tiempos de viaje e intervalos percibidos	Ampliación y potenciación de un enfoque algo explorado	Estudio de casos internacionales
7. En el corto plazo, se sugiere implementar rutas con paradas asimétricas para sus sentidos de ida y vuelta.	Corto plazo	Mejora en los intervalos de paso percibidos	Enfoque alternativo para el diseño	Entrevistas a expertos
8. En el corto plazo, sería conveniente ensayar con rutas cuyas paradas estén asignadas para atender diferentes zonas de destino en los corredores centrales.	Corto plazo	Atención eficiente de los deseos de viaje	Enfoque alternativo para el diseño	Entrevistas a expertos
9. En el mediano y largo plazo, es extremadamente importante que se implementen estaciones centrales en ciertos puntos geográficos ya identificados. Estas estaciones deben tener la capacidad suficiente para atender a los pasajeros que allí hagan transbordo y permitir el retorno operacional de los buses en el caso de implementar rutas radiales.	Mediano - largo plazo	Mejora en los intervalos de paso y la comodidad tanto en buses como en estaciones de origen, transbordo y destino	Cambio en el enfoque de diseño de nueva infraestructura en la red troncal	Estudio de casos internacionales + Elaboración propia
10. Metodología iterativa para la asignación de viajes	Corto plazo	Mejoras en las frecuencias del servicio	Una metodología alternativa de diseño	Literatura + Elaboración propia
11. No se recomienda implementar un sistema de rutas demasiado simple en el componente troncal del SITP, puesto que esto implicaría intervalos de paso muy cortos para los servicios, con sus consecuentes efectos en la formación de convoyes y largas filas de buses en las estaciones	Corto - mediano plazo	Conservación de los niveles de servicio	Información relevante para el diseño de rutas	Entrevistas a expertos + Elaboración propia

12. Se recomienda la implementación de redes de rutas diseñadas con lineamientos multicriterio, de modo que los intervalos de paso se encuentren dentro de unos límites razonables para la operación real de un sistema BRT como TransMilenio	Corto - mediano plazo	Conservación de los niveles de servicio	Confirmación de la continuación de un enfoque ya explorado	Entrevistas a expertos
---	-----------------------	---	--	------------------------

### 5.3 Alcance, limitaciones y temas abiertos para el futuro

El alcance de la investigación presentada está dado, en parte, por el desarrollo de la metodología para generar y poner a prueba diferentes conjuntos de lineamientos relativos al diseño de rutas en la red troncal del SITP. Esta metodología es totalmente replicable y puede ser utilizada con fines similares en otras ciudades, o en la misma ciudad de Bogotá, a medida que se construyan nuevas obras de infraestructura de transporte.

En cuanto a los lineamientos en sí, estos son aplicables al sistema TransMilenio con la infraestructura de transporte existente en el año 2020. Sin embargo, la modelación de transporte se ha realizado con la demanda de pasajeros existente antes de la pandemia.

Los lineamientos generados en esta investigación no se deben extrapolar al componente zonal del SITP ni a sistemas BRT de otras ciudades. Son exclusivos para el sistema BRT de Bogotá, aunque se reitera que la metodología si puede ser replicada en cualquier ciudad o cualquier sistema de transporte del mundo, en pro de determinar cuáles son las mejores estrategias de diseño de rutas en cada lugar.

De otra parte, existen cuatro limitaciones principales para la investigación desarrollada:

- Dado que la metodología de investigación se basó en la utilización de un modelo de transporte, las limitaciones de este tipo de modelos se aplican también acá. Entre ellas es posible mencionar que un modelo solo es una representación aproximada de la realidad, y que siempre habrá factores que no se pueden simular con total precisión. Además, el software de modelación utilizado podría

tener también sus limitaciones propias, las cuales se verían reflejadas en los resultados obtenidos. Adicionalmente, los datos de entrada utilizados -matriz semilla de la troncal, registros de validaciones y salidas troncales, Encuesta de Movilidad 2019, documento con la línea base de evasión en TransMilenio- poseen intervalos de confianza y niveles de error correspondientes al proceso de muestreo con el que han sido generados. Esto se transmite directamente a la presente investigación, aunque de cualquier modo se debe considerar que estas fuentes de información han sido validadas por los entes gubernamentales, académicos y privados responsables de su elaboración, y por lo tanto, su uso está justificado en el ámbito actual.

- La presente investigación se limita a evaluar diferentes escenarios de redes de rutas contemplando los corredores troncales existentes en 2020. En los próximos años, a medida que se construya nueva infraestructura -nuevas troncales, Metro y Regiotram- será necesario replicar este estudio para actualizar los lineamientos de diseño de rutas troncales.
- La emergencia sanitaria causada por el COVID-19 ha tenido un profundo impacto en los hábitos de movilidad de los bogotanos. Estos cambios no se han contemplado en el modelo de transporte, puesto que simplemente aún existe mucha incertidumbre al respecto. En el momento en que se recupere la vida normal, será necesario evaluar la demanda en el componente troncal del SITP para determinar si es necesario actualizar los lineamientos generados. De cualquier modo, el investigador espera que en el mediano plazo se recuperen los patrones de viaje previos a la pandemia.
- La investigación se ha desarrollado desde la perspectiva de un modelo de transporte, considerando la oferta y la demanda como sus pilares base. Sin embargo, no se ha considerado el efecto de los escenarios planteados en el tránsito de los buses sobre la red troncal. Por lo tanto, es necesario implementar esquemas de micromodelación que permitan ratificar, desde la perspectiva de tránsito, las recomendaciones aquí dadas.

En cuanto a temas abiertos para el futuro, el investigador plantea los siguientes, y además, anima a los potenciales lectores a adoptar alguno para sus propias investigaciones:

- Desarrollo de planes piloto para la implementación de las propuestas planteadas de acuerdo a los lineamientos generados. Esto incluye el diseño de proyectos piloto para su implementación real, la concertación y divulgación de los pilotos con los actores del sistema, y una metodología para la evaluación y retroalimentación de los resultados. Todo lo anterior, tomando en cuenta el impacto en los usuarios y la percepción que estos tengan de los cambios. Además, cualquier implementación de las propuestas aquí planteadas debe realizarse de forma gradual y planificada.
- Replicación de la metodología propuesta para generar lineamientos sobre el diseño de rutas troncales al momento de la entrada del Metro, el Regiotram y las nuevas troncales.
- Replicación de la metodología para actualizar los lineamientos a las nuevas condiciones postpandemia, en caso de comprobarse que la demanda en el transporte público sufrirá cambios significativos a mediano y largo plazo.
- Elaboración de un modelo de tránsito para el componente troncal del SITP, que permita la micromodelación de los diferentes escenarios planteados de redes de rutas, y amplíe la comprensión de sus efectos operacionales a nivel de corredores troncales, portales, estaciones, retornos, intersecciones, interconectores, etc.
- Diseño geométrico de los retornos operacionales requeridos dentro y fuera de las estaciones centrales propuestas, en el caso de implementar rutas radiales de forma generalizada.
- Replicación y ampliación de la metodología propuesta para la evaluación de diferentes escenarios de redes de rutas para el componente zonal del SITP. Esto toma especial relevancia al momento de considerar que el sistema de transporte de Bogotá debe entenderse como un todo, cuya planificación debe gestionarse de

forma integrada incluyendo varios modos. Entonces, partiendo de lo establecido en la presente investigación, será posible generar lineamientos específicos para las rutas del SITP zonal, que complementen de forma oportuna lo que aquí se propone para la troncal BRT.

- Realización de un estudio sociodemográfico con el objetivo de conocer las preferencias de los usuarios al momento de priorizar diferentes indicadores, tales como tiempos de viaje, intervalos de paso de las rutas, comodidad en buses y estaciones, disposición a realizar transbordos, etc.
- Evaluación del impacto económico de operar con redes de rutas generadas con unos u otros lineamientos. Esto incluye, más no se limita a la cuantificación del CAPEX y del OPEX requeridos en diferentes escenarios.
- Concepción y desarrollo de un planificador de viajes en tiempo real. Se ha demostrado aquí que esta herramienta traería beneficios notables para los usuarios y la operación del sistema. Es necesario evaluar su viabilidad económica y tecnológica, diseñar y probar interfaces de usuario accesibles, garantizar la disponibilidad de la información operacional en tiempo real, desarrollar y probar los algoritmos del planificador de viajes, entre otras tareas. Además, es importante notar que TransMilenio S.A. ya cuenta con una aplicación de usuario “TransMi App” [89] que contiene cierto nivel de información. Sin duda, esta aplicación podría convertirse en la piedra angular para futuros desarrollos.
- Generación automatizada de redes de rutas mediante inteligencia artificial: aprendizaje de máquinas, redes neuronales y/o algoritmos genéticos. La idea detrás es que en esta investigación se desarrollaron unos procesos heurísticos para el diseño sistemático de las redes de rutas, incluyendo trazados geográficos, puntos de parada y frecuencias. Si estos procesos heurísticos se convierten en algoritmos que se ejecuten autónomamente, y si se desarrolla una herramienta que permita evaluar numerosos escenarios en poco tiempo, será posible generar redes de rutas que optimicen los niveles de servicio y minimicen los costos operacionales. Todo esto mediante el uso de inteligencia artificial. Sin duda, este es un campo muy interesante que puede ser explorado en el futuro cercano.

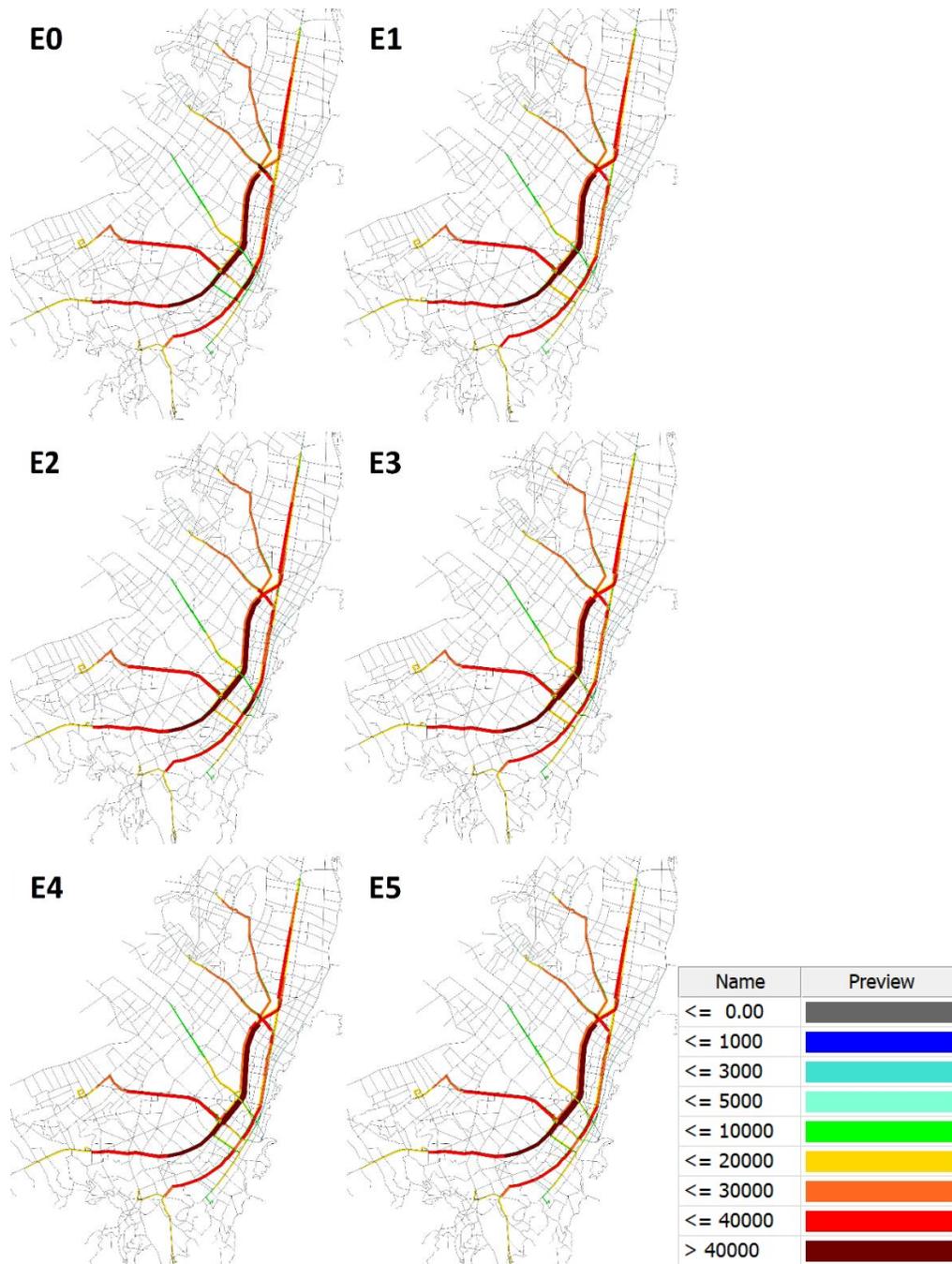
## **A. Anexo: Resultados cartográficos de los casos de simulación y sus escenarios.**

El presente anexo muestra los resultados cartográficos de los casos de simulación, incluyendo sus respectivos escenarios, según lo descrito en la sección 4.3. En cada caso de simulación los escenarios de redes de rutas se numeran de E0 a E5, en correspondencia con los escenarios generados en la sección 3.4.

## A.1 Resultados del caso 1: transbordos con penalización baja e información de salidas en plataforma

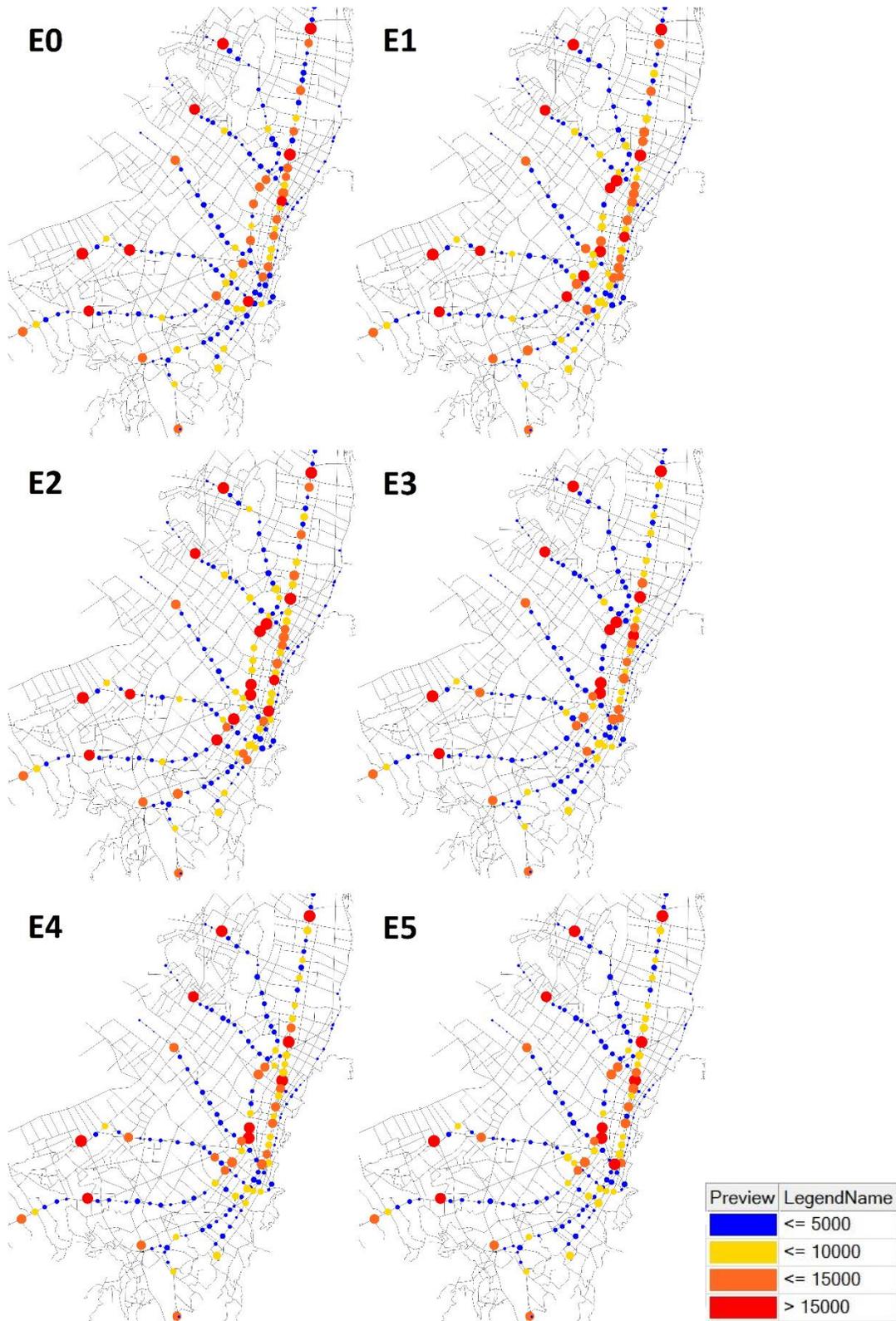
El anexo A.1 muestra los resultados cartográficos de los 6 escenarios de rutas en el primer caso de simulación.

**Figura A-1:** Volumen de pasajeros por arco en el caso 1

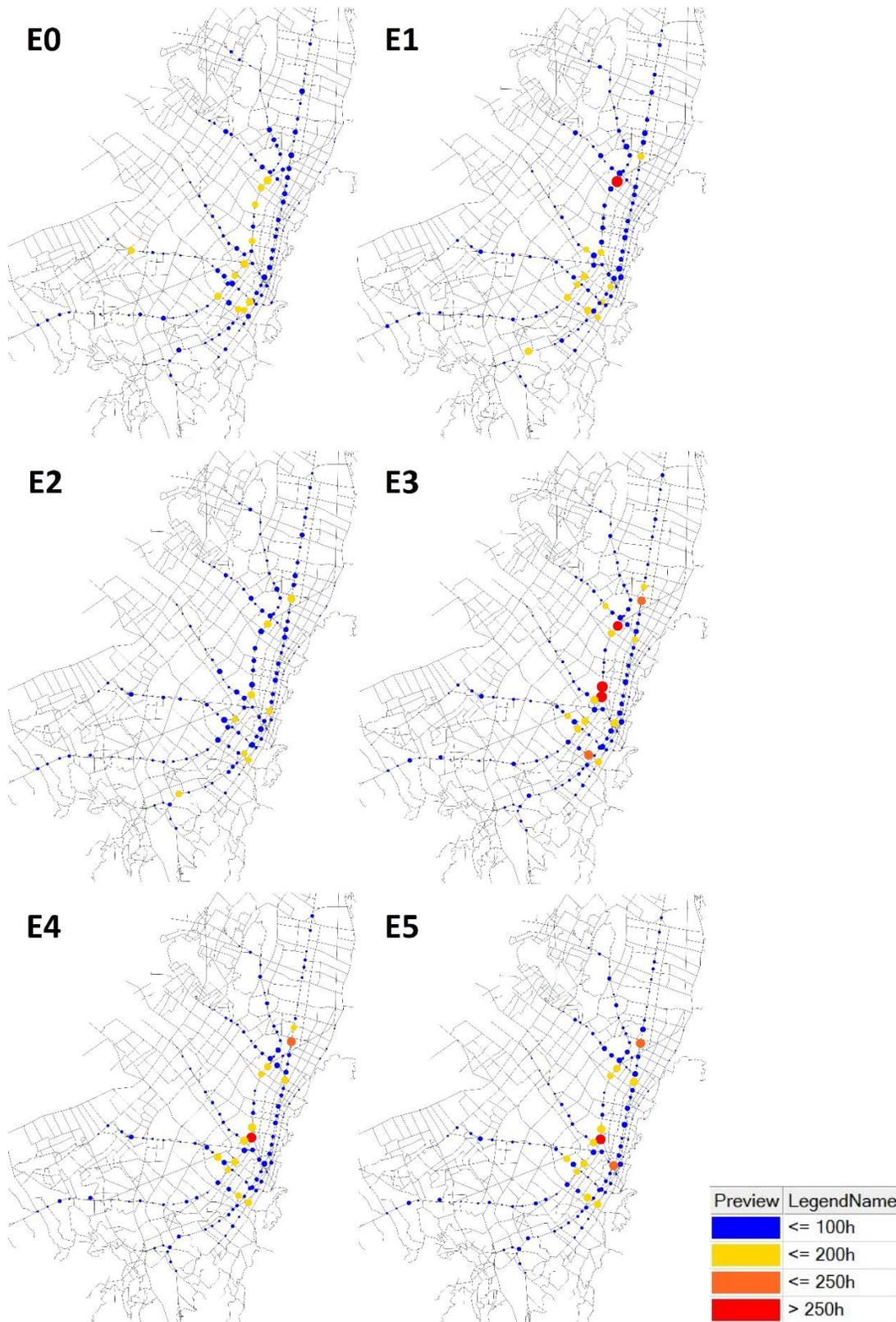


Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Figura A-2: Usuarios totales por estación en el caso 1



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

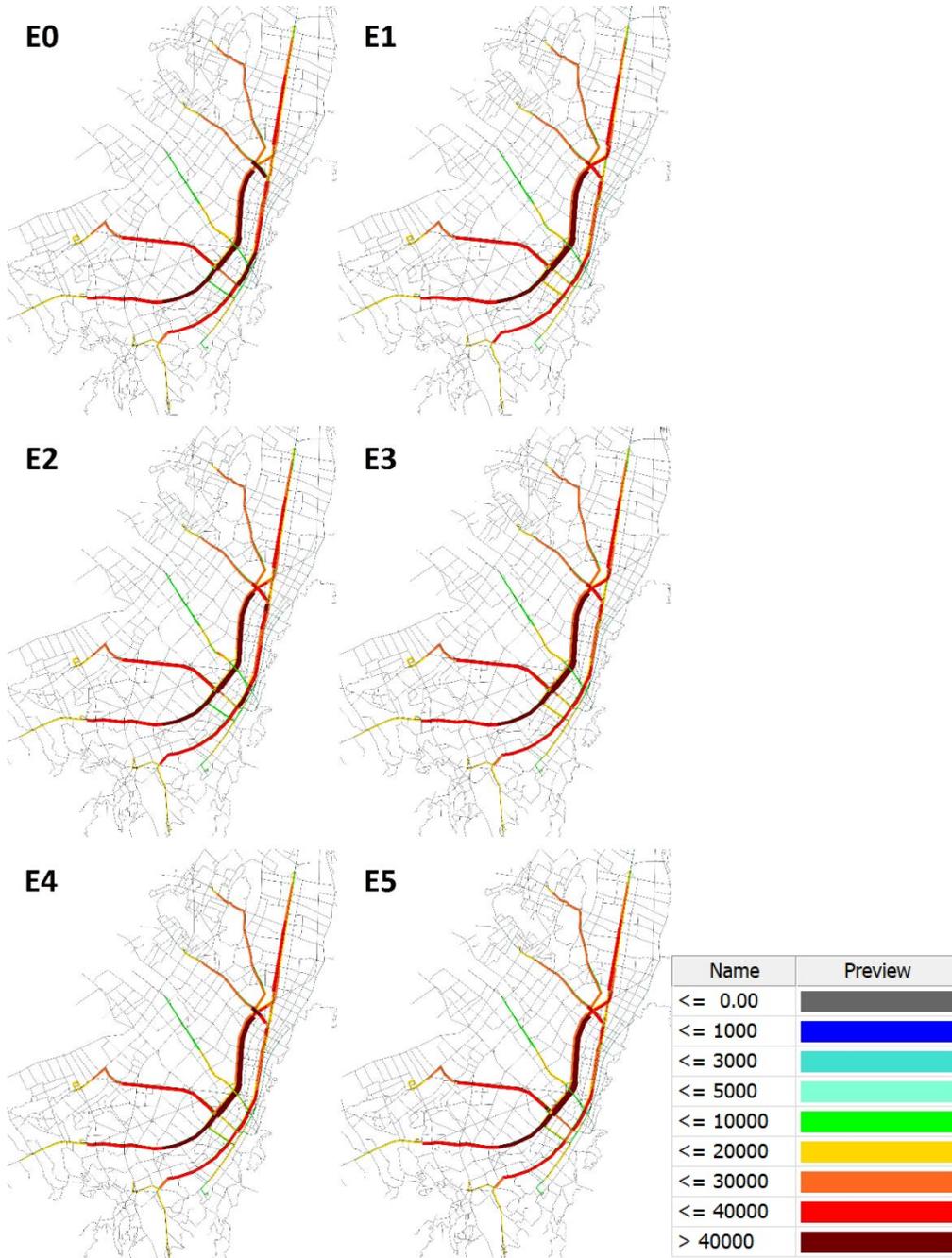
**Figura A-3: Tiempo de transbordo total por estación en el caso 1**

Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

## A.2 Resultados del caso 2: transbordos con penalización media e información de salidas en plataforma

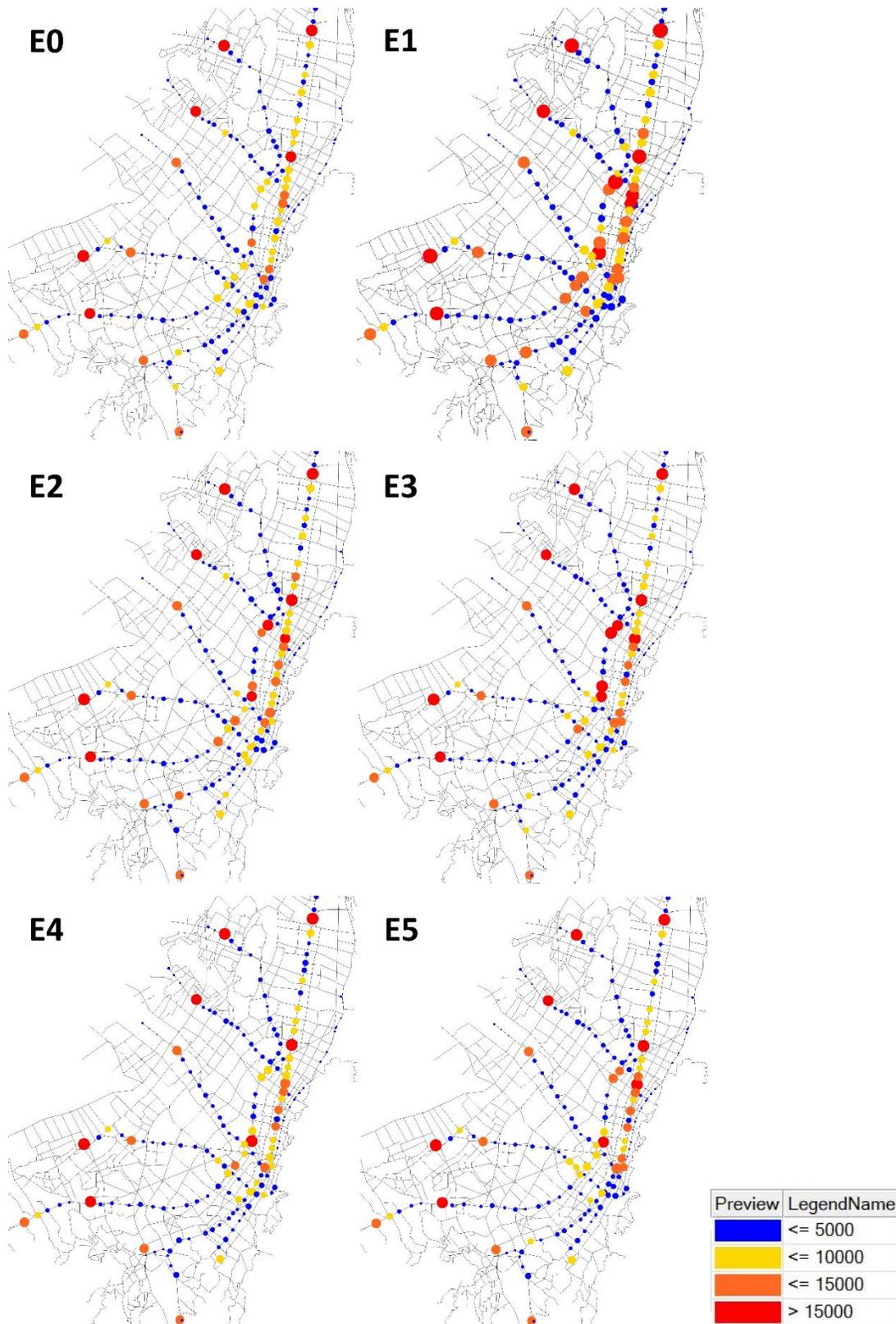
El anexo A.2 muestra los resultados cartográficos de los 6 escenarios de rutas en el segundo caso de simulación.

**Figura A-4:** Volumen de pasajeros por arco en el caso 2



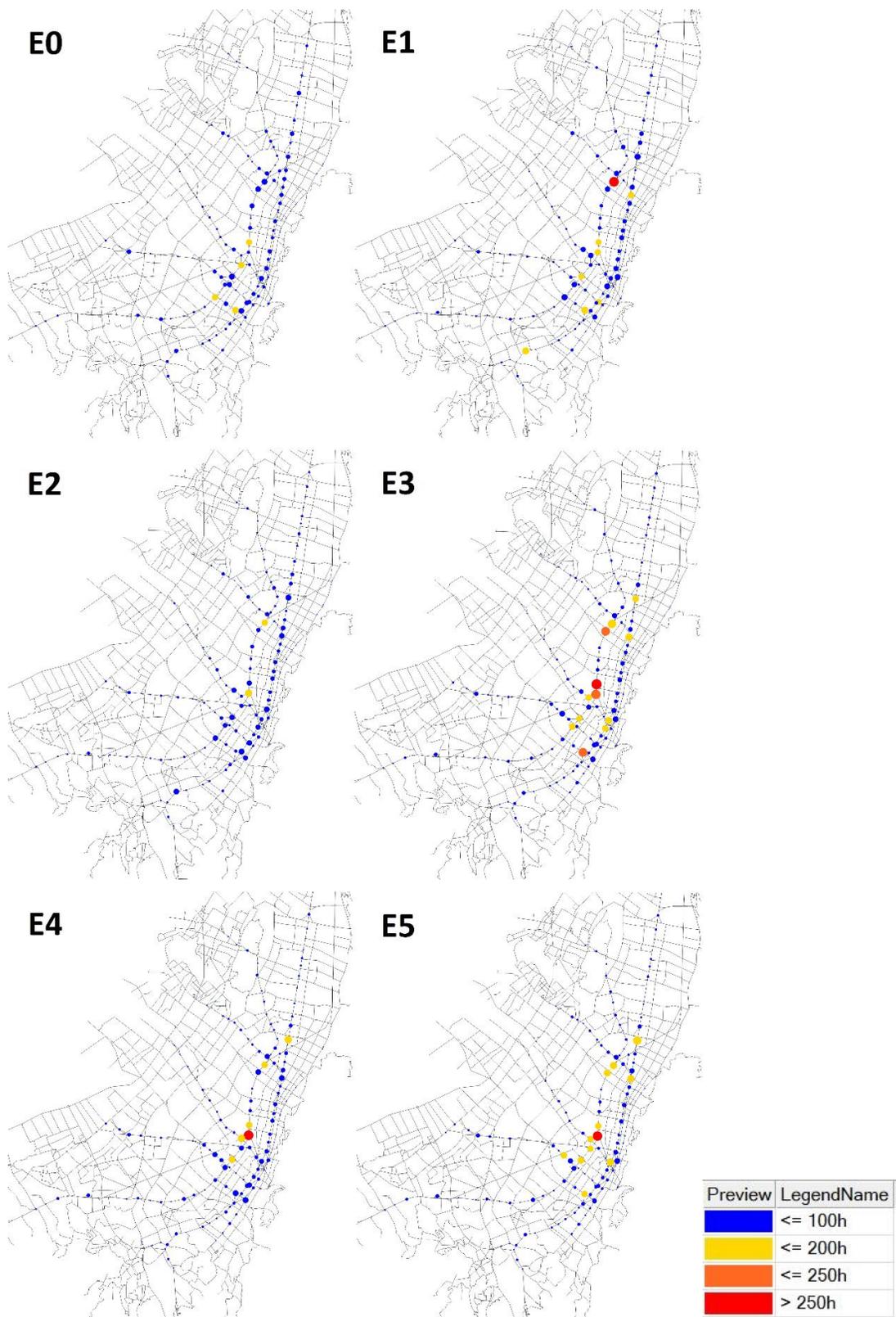
Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Figura A-5: Usuarios totales por estación en el caso 2



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Figura A-6: Tiempo de transbordo total por estación en el caso 2**

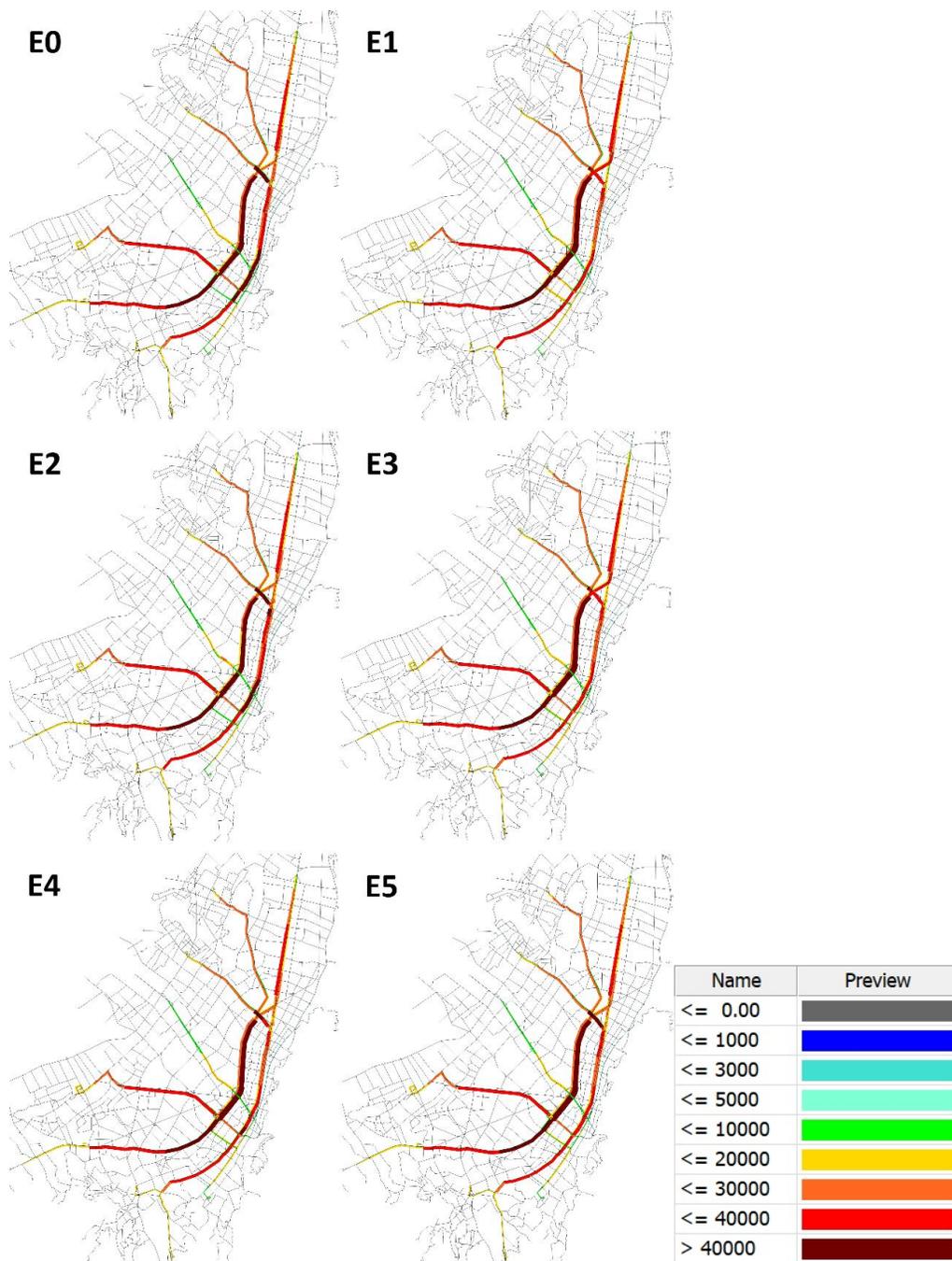


Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

### A.3 Resultados del caso 3: transbordos con penalización alta e información de salidas en plataforma

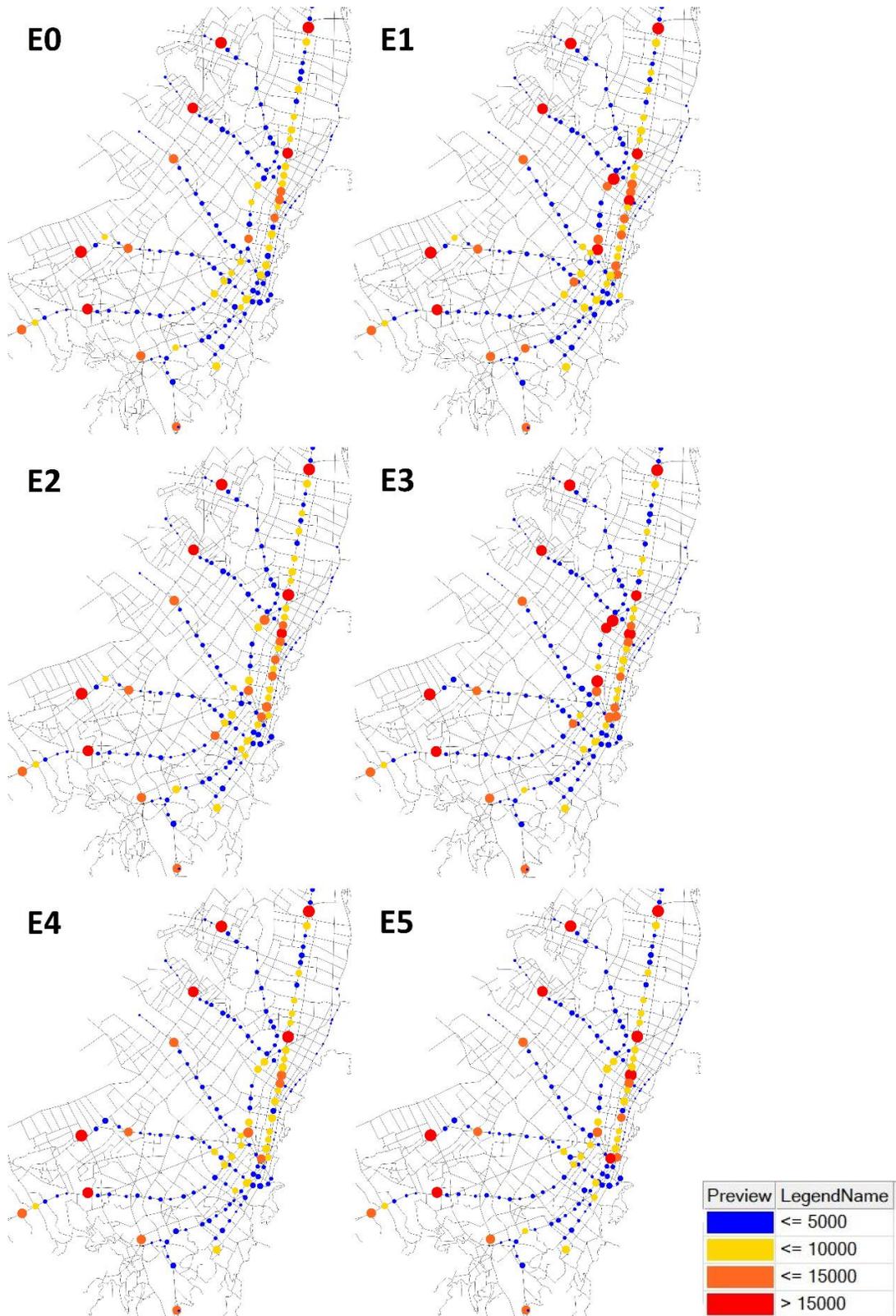
El anexo A.3 muestra los resultados cartográficos de los 6 escenarios de rutas en el tercer caso de simulación.

**Figura A-7:** Volumen de pasajeros por arco en el caso 3

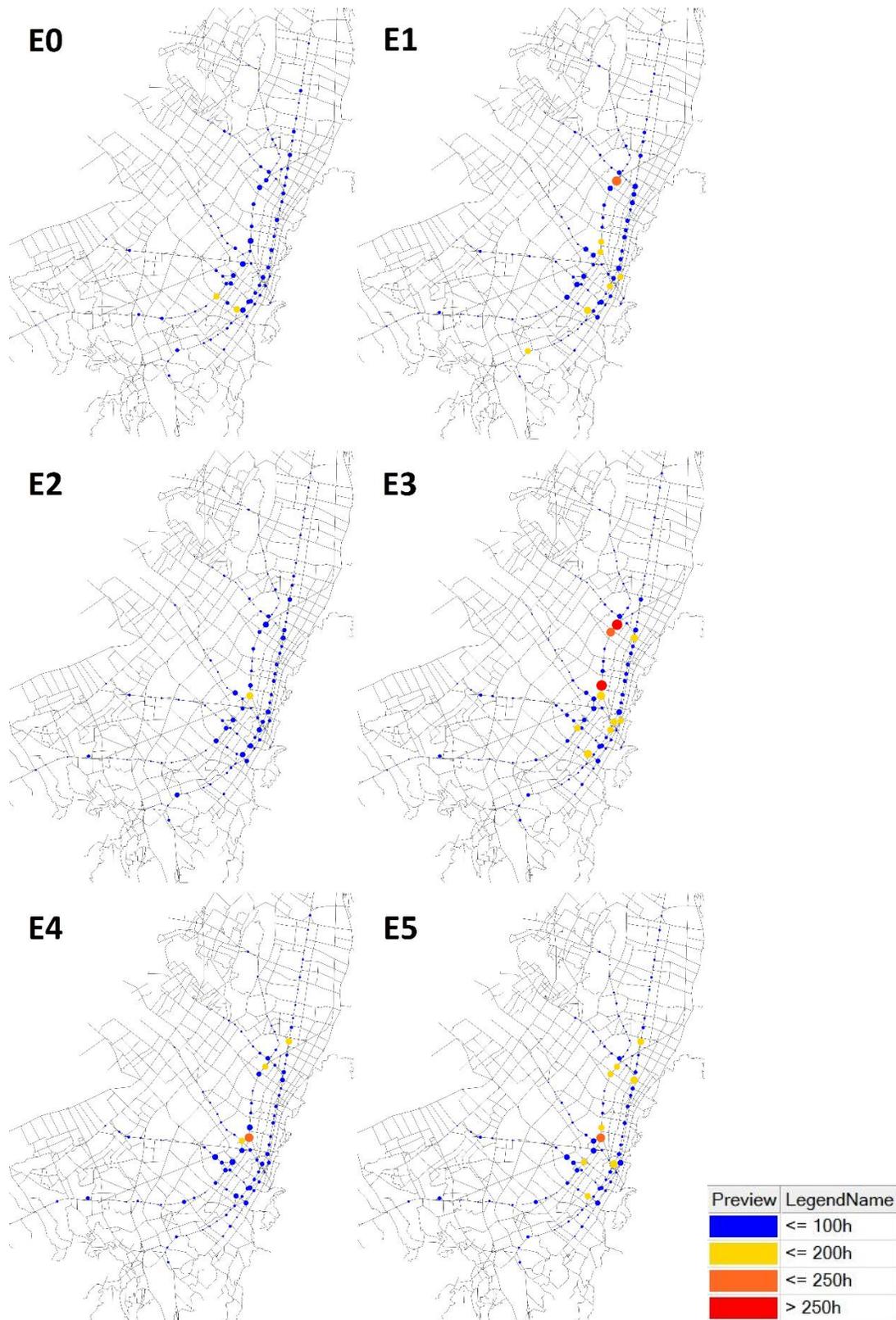


Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Figura A-8: Usuarios totales por estación en el caso 3**



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

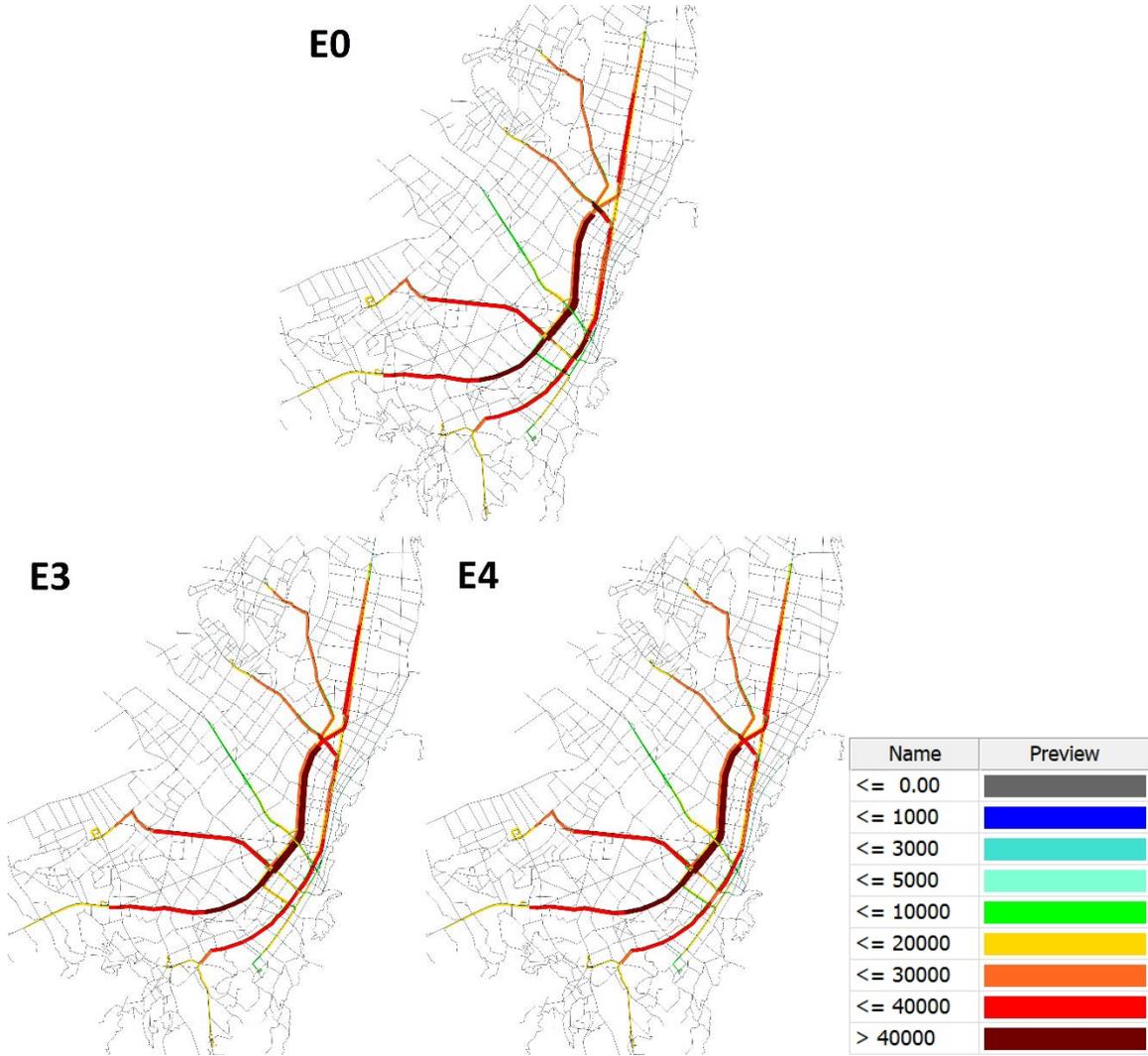
**Figura A-9:** Tiempo de transbordo total por estación en el caso 3

Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

## A.4 Resultados del caso 4: transbordos con penalización baja e información completa para el usuario

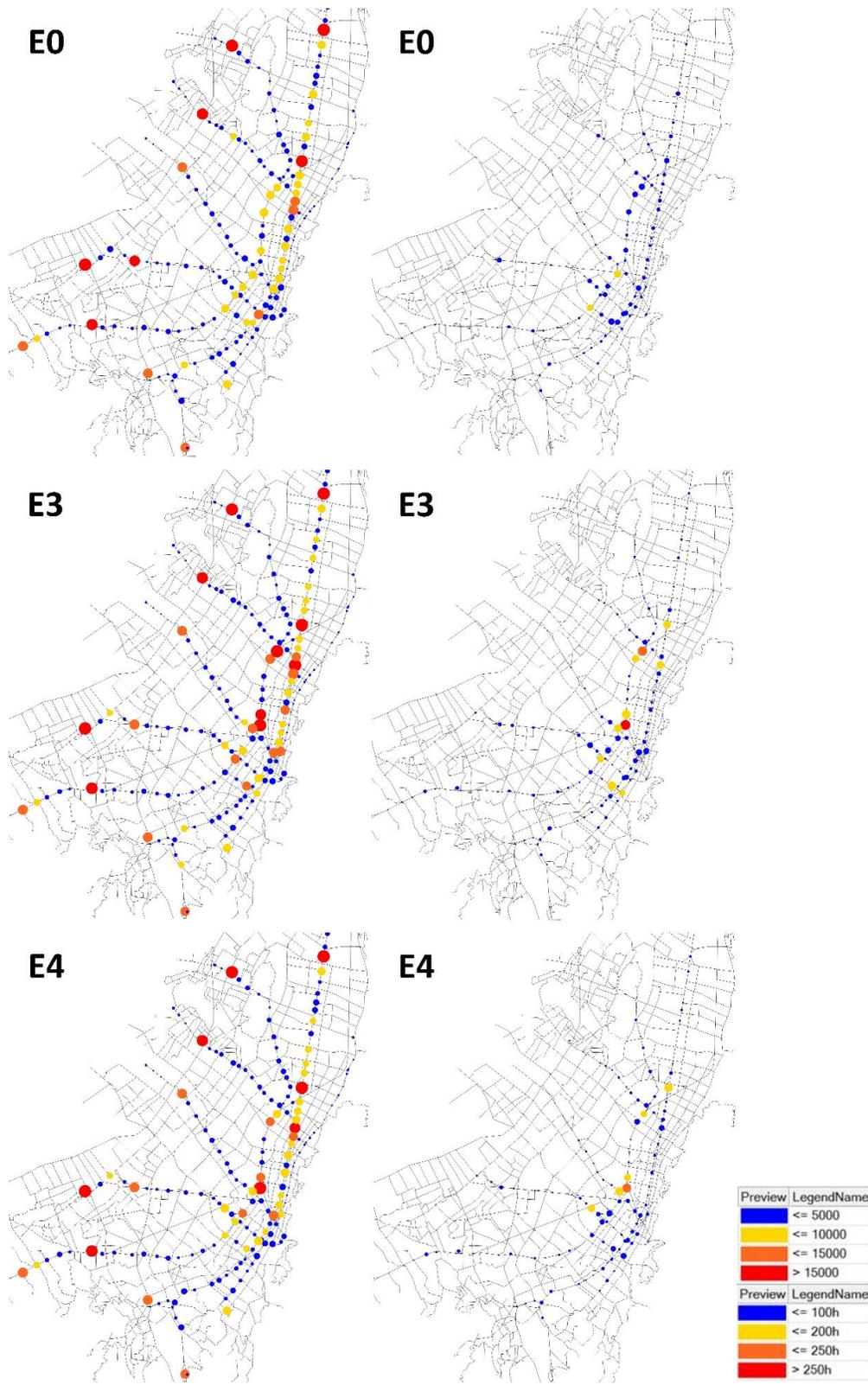
El anexo A.4 muestra los resultados cartográficos de los escenarios de rutas 0, 3 y 4 en el cuarto caso de simulación.

**Figura A-10:** Volumen de pasajeros por arco en el caso 4



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Figura A-11: Usuarios totales y tiempo de transbordo total por estación en el caso 4

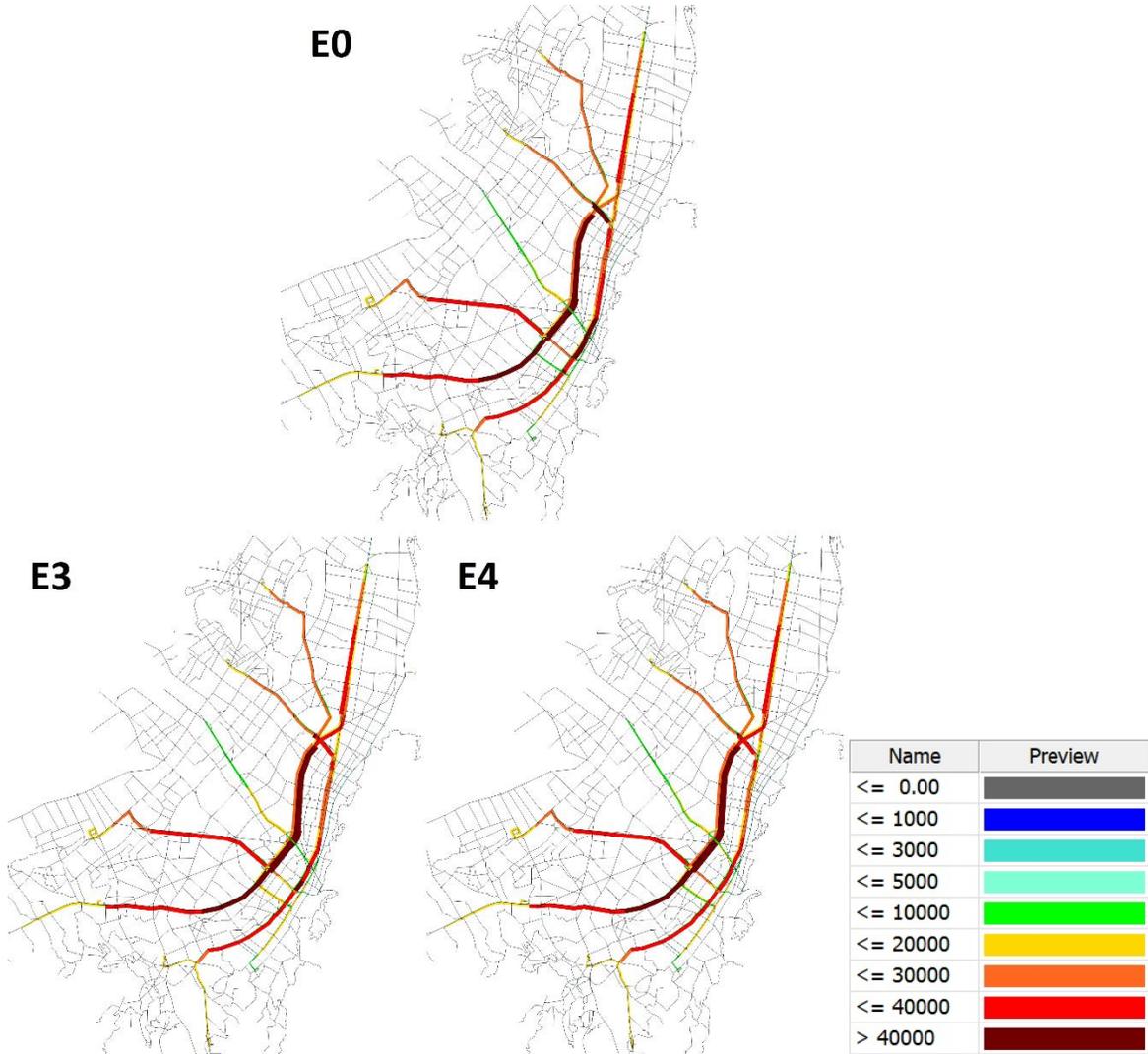


Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

## A.5 Resultados del caso 5: transbordos con penalización intermedia e información completa para el usuario

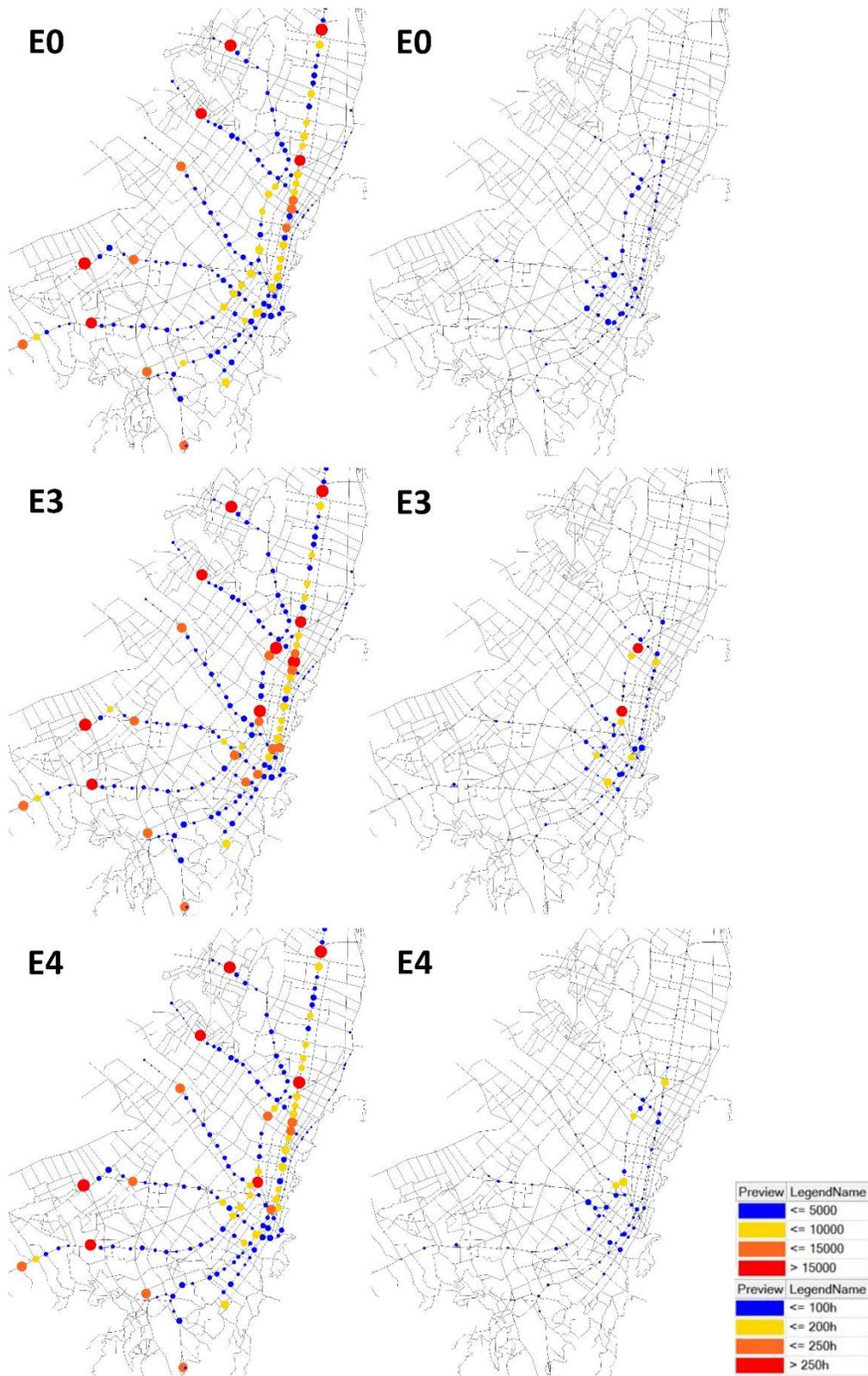
El anexo A.5 muestra los resultados cartográficos de los escenarios de rutas 0, 3 y 4 en el quinto caso de simulación.

**Figura A-12:** Volumen de pasajeros por arco en el caso 5



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

**Figura A-13:** Usuarios totales y tiempo de transbordo total por estación en el caso 5

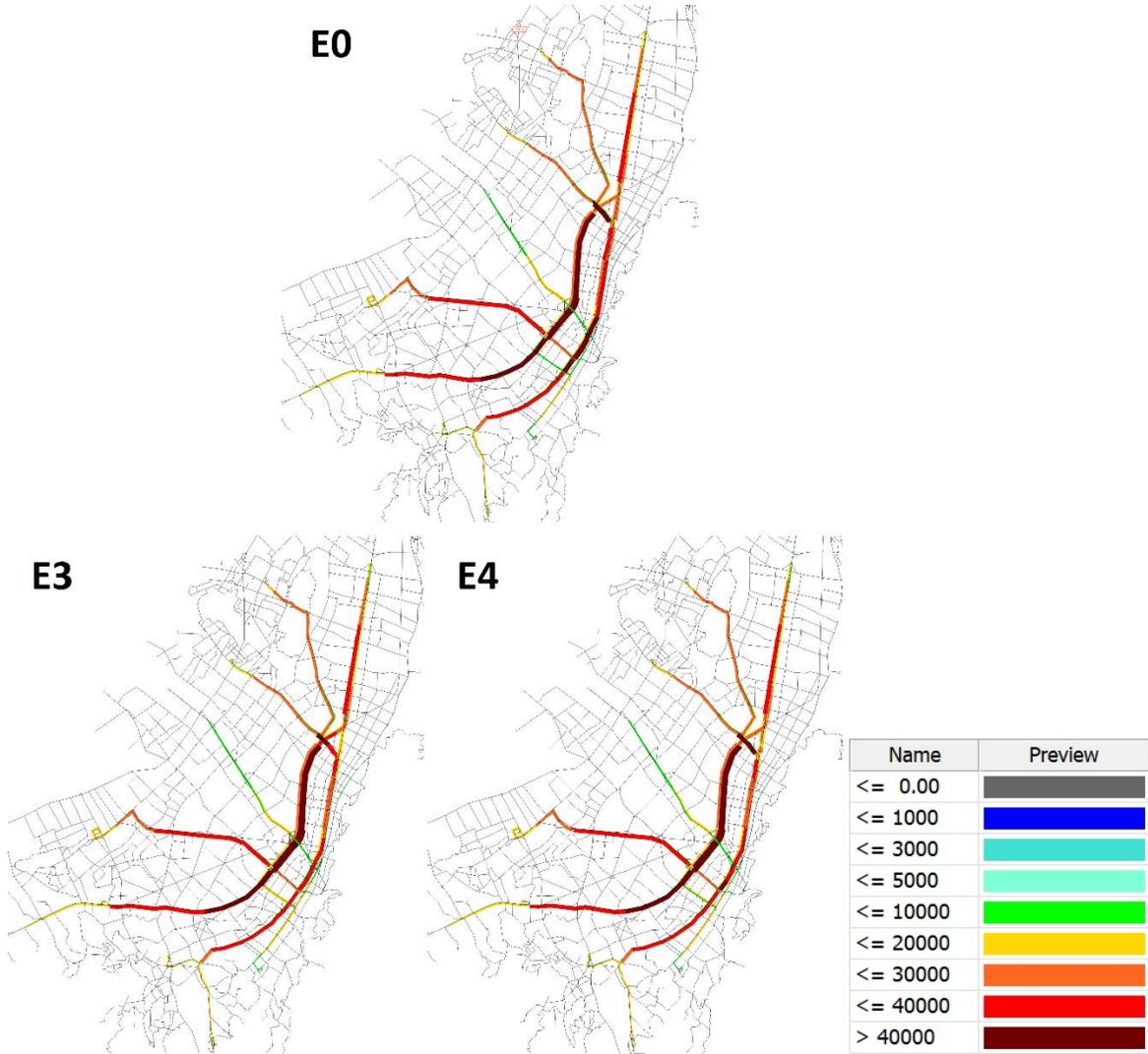


Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

## A.6 Resultados del caso 6: transbordos con penalización alta e información completa para el usuario

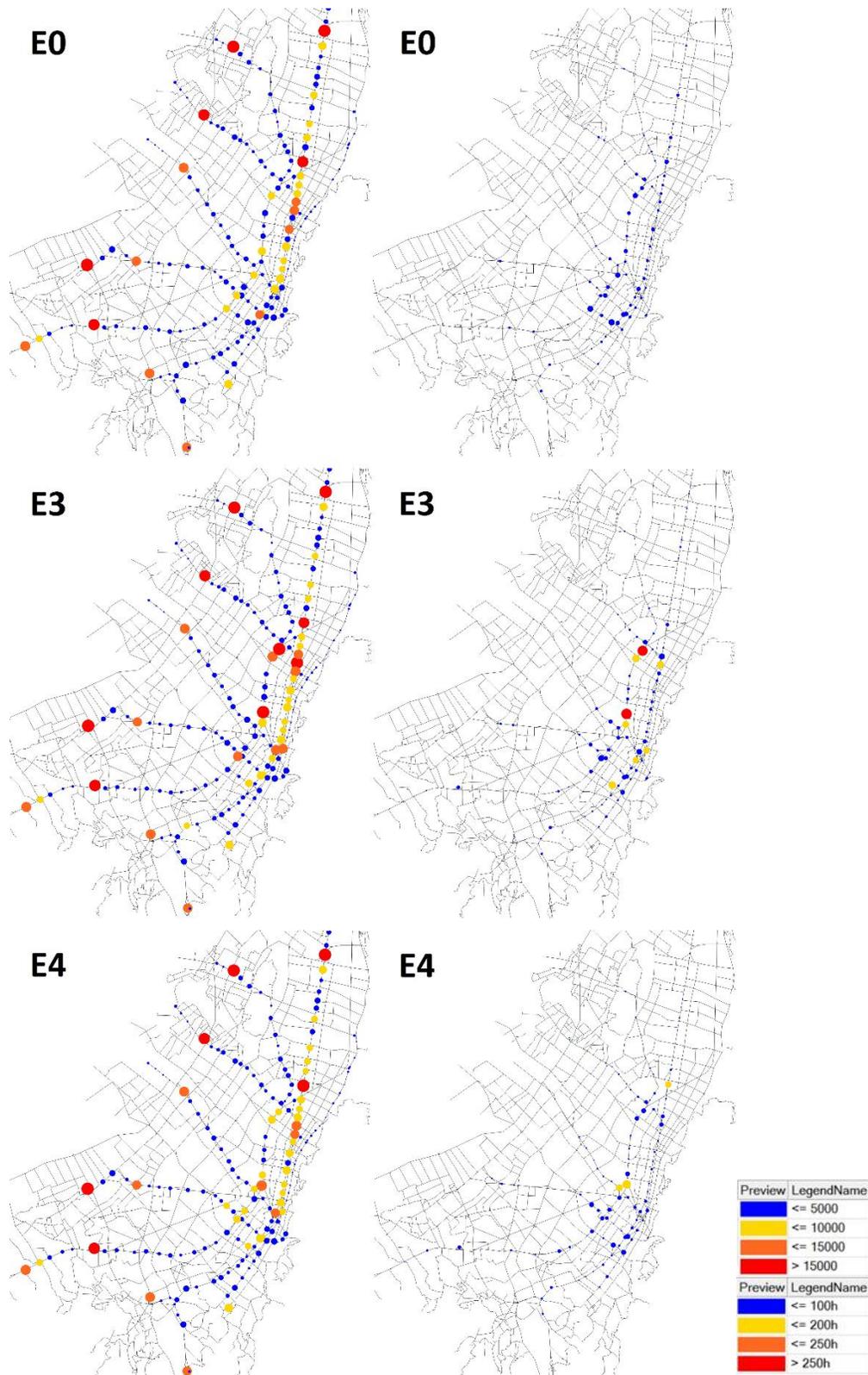
El anexo A.6 muestra los resultados cartográficos de los escenarios de rutas 0, 3 y 4 en el sexto caso de simulación.

**Figura A-14:** Volumen de pasajeros por arco en el caso 6



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM.

Figura A-15: Usuarios totales y tiempo de transbordo total por estación en el caso 6



Fuente: Elaboración propia en el software PTV-VISUM

## **B. Anexo: Detalle del estudio de casos internacionales**

Se presenta a continuación el detalle de los dos casos de estudio analizados: Santiago de Chile y Lima, Perú.

### **B.1 Santiago de Chile**

#### **Estructura administrativa:**

La capital de Chile es el principal centro económico y político del país austral. Su PIB para 2018 constituyó el 42,09% del total de la nación [90]. Su organización político-administrativa es diferente a la de otras ciudades del mundo, puesto que no pertenece a una única provincia o comuna, sino que por el contrario, dentro de la denominada Región Metropolitana de Santiago se encuentran los territorios de 6 provincias que, a su vez, contienen 52 comunas [91]. Para efectos de este estudio de caso, el enfoque estará en el núcleo urbano conocido como Gran Santiago (en adelante, núcleo urbano de Santiago), el cual comprende territorios de 5 provincias y 40 comunas [57]. Es de notar que no necesariamente el territorio completo de cada una de estas provincias o comunas hace parte integral del núcleo urbano de Santiago.

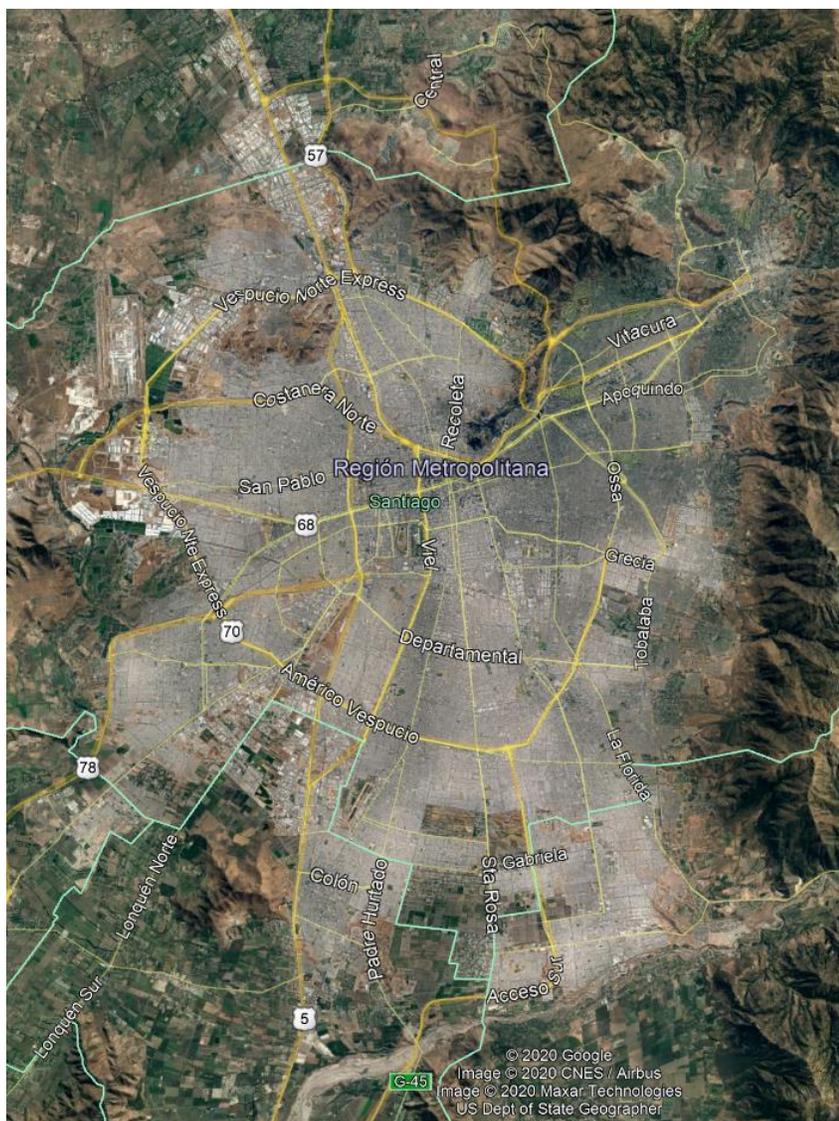
Esta particular configuración de la ciudad se ve reflejada en sus estructuras de gobierno. Por un lado, cada comuna cuenta con un alcalde y un concejo elegidos por votación popular [92]. Por otro lado, existe un gobierno regional de nivel superior conformado por el Consejo Regional, elegido por votación popular, y el Intendente Regional, nombrado directamente por el Presidente de la República, y quien preside el Consejo [93].

En lo relativo a la administración del sistema de transporte de la ciudad, en el año 2013 se creó el Directorio de Transporte Público Metropolitano (DTPM) como “...*el organismo*

encargado de articular, coordinar y supervisar las acciones, programas y medidas tendientes a gestionar el transporte público mayor de la ciudad de Santiago” [94]. El DTPM tiene como principales integrantes, según el instructivo presidencial correspondiente a su creación [95], al Ministro de Transporte y Comunicaciones, quien lo preside; el Ministro de Vivienda y Urbanismo, vicepresidente del directorio; el Ministro de Obras Públicas; y el Intendente de la Región Metropolitana. Es valioso resaltar en este punto que, dada la conformación del DTPM, la administración del sistema de transporte de Santiago depende del gobierno central del país.

### Geografía:

**Figura B-1:** Núcleo urbano de Santiago de Chile



Fuente: Tomada de Google Earth [Último acceso: 18 02 2020].

En cuanto a su forma geográfica, el núcleo urbano de Santiago tiene un área más o menos bien definida como puede verse en la Figura B-1. A nivel micro y medio, sus calles están trazadas en forma de cuadrícula con bloques de manzanas aproximadamente rectangulares. Sin embargo, a nivel macro puede observarse que las grandes avenidas tienden a conformar un conjunto de líneas radiales que se dirigen hacia el centro de la ciudad, zona que corresponde a la Comuna de Santiago y que constituye el núcleo histórico original [96]. Se hace esta referencia a la configuración vial del núcleo urbano, puesto que es importante para entender el diseño de la red de rutas de transporte público.

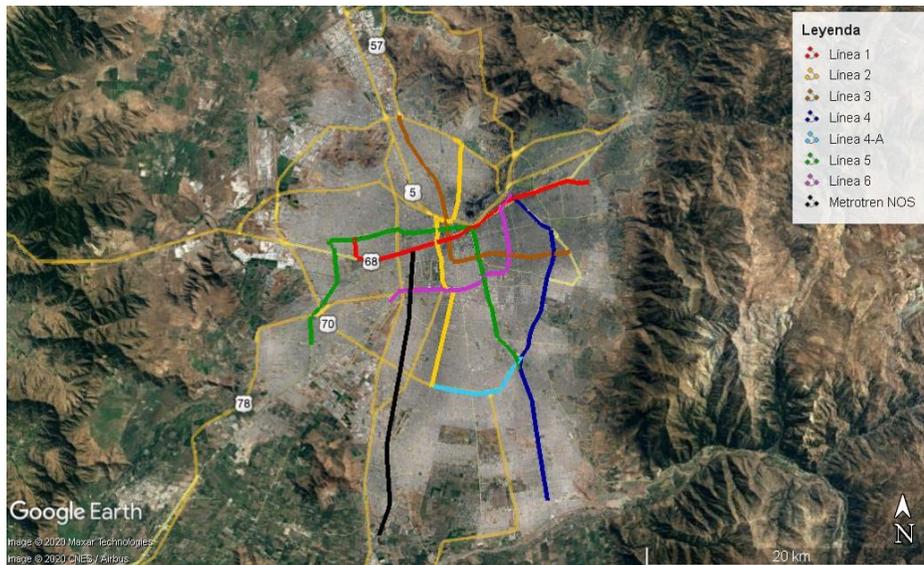
**Sistema de transporte:**

Red Metropolitana de Movilidad, conocido anteriormente como Transantiago, es el sistema de transporte de la ciudad (febrero de 2020). Integra física y tarifariamente los sistemas de metro, buses y tren de cercanías [59]. El pago se realiza con una tarjeta inteligente de transporte llamada “bip!” que debe ser recargada previamente. El esquema tarifario permite realizar hasta dos transbordos que pueden incluir un transbordo en el servicio de metro y otro en el sistema de tren. Los transbordos también pueden ser entre buses de distintas rutas y la ventana de tiempo es de 120 minutos. Existen tarifas diferenciales de hora punta y hora valle, así como tarifas estudiantiles y de la tercera edad [67].

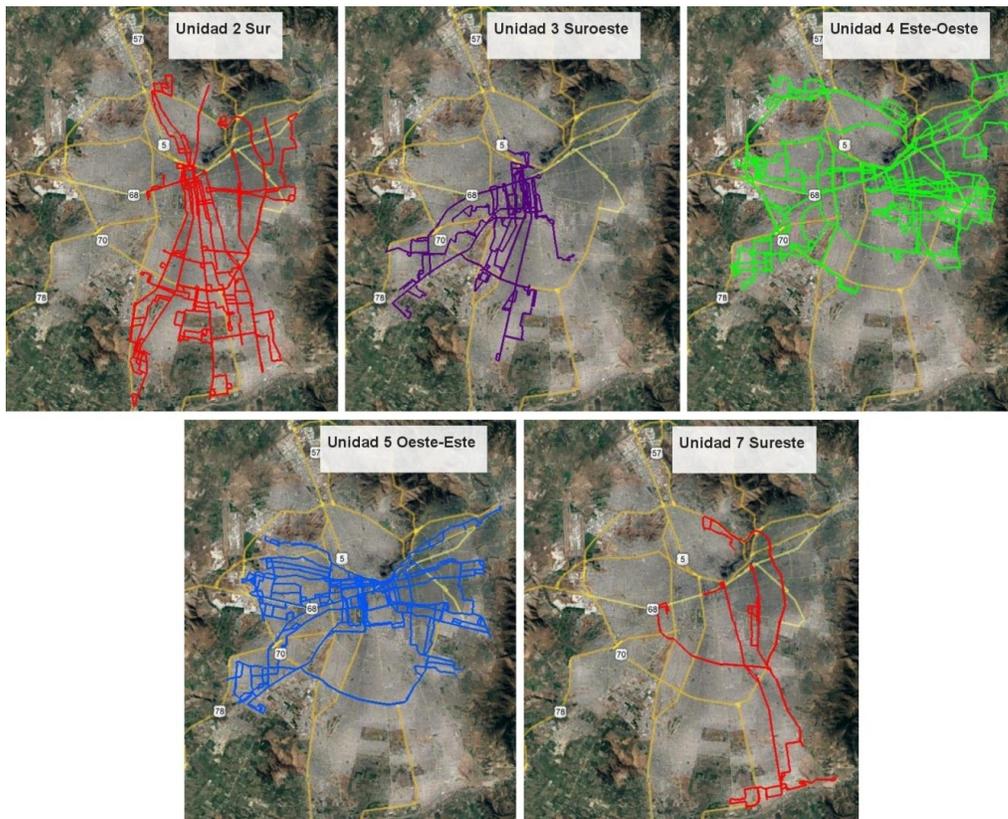
**Descripción de los servicios de transporte:**

El sistema de transporte de Santiago gira alrededor de las 7 líneas Metro actualmente construidas, las cuales se muestran en la Figura B-2, junto al MetroTren NOS, el cual funge como un tren de cercanías que conecta la comuna de San Bernardo, en el extremo sur del núcleo urbano, con el centro de la ciudad [59].

La línea de MetroTren NOS y las líneas 1, 2, 3 y 5 del Metro tienen una clara configuración radial conectando zonas periféricas con el centro geográfico de la urbe. El tramo sur de la línea 4 sirve como extensión radial de la línea 5 hacia el extremo sureste, al tiempo que la combinación de las líneas 4 y 4-A presenta un trazado perimetral. La línea 6 se encarga de cerrar un circuito que interconecta las demás líneas alrededor de la zona central de la ciudad permitiendo la descongestión de la línea 1.

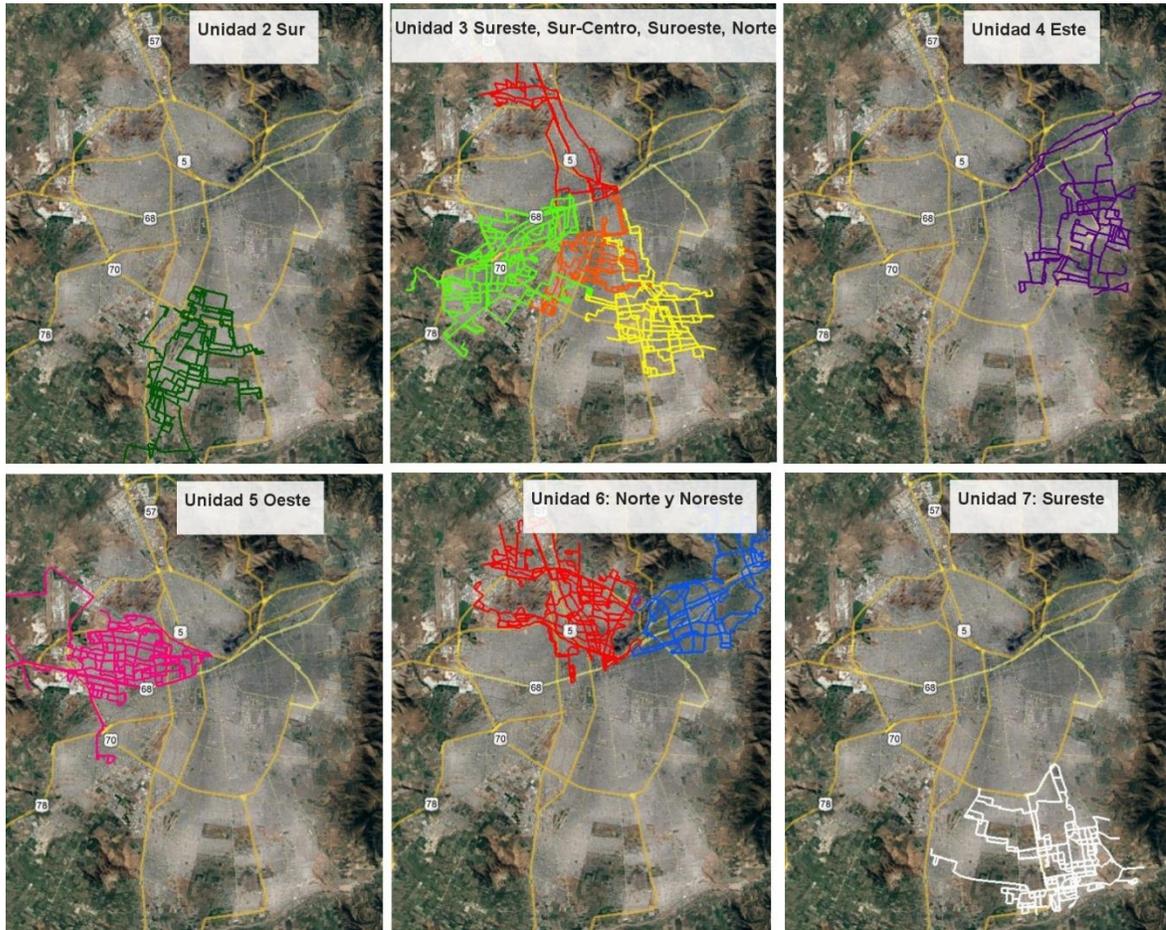
**Figura B-2:** Red de Metro y MetroTren, Santiago de Chile

Fuente: Mapa de líneas descargable de la página oficial del Metro de Santiago [62], fondo en Google Earth [Último acceso: 18 02 2020].

**Figura B-3:** Servicios largos por unidad de negocio de Red Metropolitana de Movilidad

Fuente: Mapa de servicios descargable de la página oficial del DTPM [97], fondo en Google Earth [Último acceso: 18 02 2020].

**Figura B-4:** Servicios colectores por unidad de negocio de Red Metropolitana de Movilidad



Fuente: Mapa de servicios descargable de la página oficial del DTPM [97], fondo en Google Earth [Último acceso: 18 02 2020].

Por otra parte, el sistema de buses está conformado por 6 empresas operadoras [98] divididas en unidades de negocio con servicios que aproximadamente pueden asociarse a ciertas zonas geográficas. Para efectos de ilustrar esta asociación entre zonas y unidades de negocio, se han clasificado, según criterio del investigador, las rutas de buses en dos categorías:

- **Servicios largos:** son servicios que conectan zonas periféricas con el centro de la ciudad o con otras zonas periféricas en extremos opuestos. Corresponden a rutas de largo recorrido que complementan a las líneas de Metro en las zonas donde este no tiene cobertura o presenta saturación. Estas rutas se caracterizan

por tener trazados radiales o diametrales aunque también es posible encontrar algunas rutas perimetrales. Ver Figura B-3.

- **Servicios colectores:** son servicios de corto recorrido que operan sobre zonas geográficas muy bien definidas y que sirven como rutas alimentadoras para las líneas de Metro y las rutas de buses más largas. Ver Figura B-4.

La clasificación entre servicios largos y servicios colectores por unidad de negocio ha sido realizada conforme al criterio del investigador, para ilustrar algunos de los lineamientos generales usados en el diseño de estos trazados geográficos, tales como zonificación de rutas, interconexión de la periferia con el centro mediante trazados radiales o diametrales, complementación y paralelismo con las líneas de Metro, y existencia de una amplia red de servicios alimentadores. Sin embargo, dentro de Red Metropolitana de Movilidad existe una clasificación operacional propia de los servicios, la cual se describe a continuación [99]:

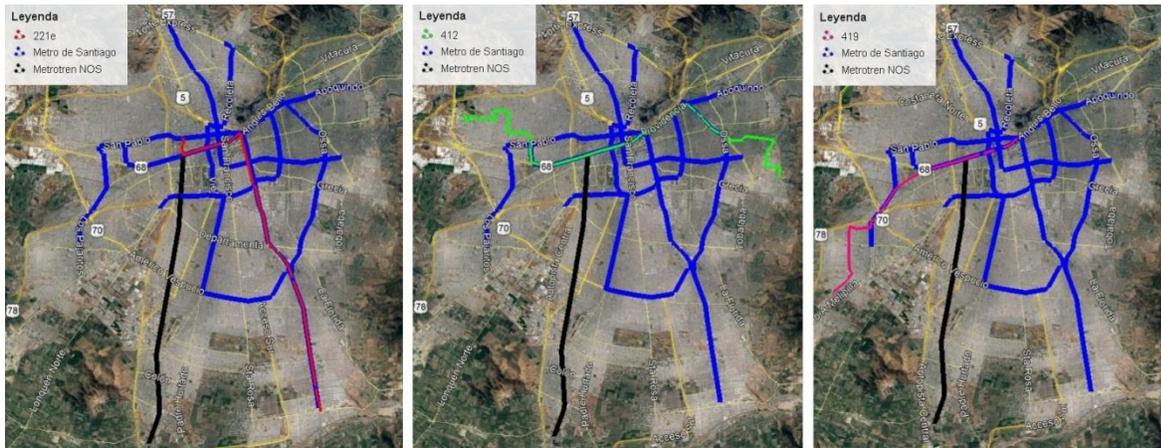
- **Servicios normales:** son servicios que recorren las vías arteriales de la ciudad y que operan durante el horario habitual del sistema, deteniéndose en todos los paraderos.
- **Servicios cortos:** son una variación de los servicios normales que operan solo en una parte del recorrido para reforzar la oferta en los tramos y horarios con mayor carga de pasajeros.
- **Servicios expresos:** corresponden a servicios normales que solo se detienen en ciertas paradas específicas. Operan habitualmente en las horas de mayor demanda, aunque existen algunos que operan todo el día. Así mismo, es posible encontrar que algunos de estos servicios transitan por autopistas urbanas en lugar de hacerlo por las vías tradicionales usadas por sus contrapartes normales.
- **Servicios superexpresos:** variante de los servicios expresos que solo se detiene en unas pocas paradas al inicio y al final de su recorrido.

- **Servicios variantes:** son servicios que comparten el punto de inicio y el punto final de su correspondiente servicio normal, pero que llegan a su destino por una ruta diferente.
- **Servicios nocturnos:** servicios derivados de los servicios normales que operan durante las noches fuera del horario habitual del sistema general. Sus frecuencias son mucho más altas y pueden tener modificaciones significativas en sus trazados respecto al servicio normal del que se derivan.
- **Servicios especiales:** rutas de transporte público que se programan en momentos puntuales para atender eventos específicos que impliquen grandes aglomeraciones de personas.
- **Servicios inyectados:** más que de un tipo de servicio, se trata de buses que son inyectados en algún punto del recorrido de un servicio normal para reforzar la oferta en puntos críticos durante las horas de mayor demanda.
- **Servicios 24 horas:** son servicios normales que operan durante las 24 horas del día sin cambiar su recorrido habitual ni la nomenclatura de su nombre.
- **Servicios con horario fijo:** se trata de servicios que pueden pertenecer a cualquiera de las categorías anteriores, pero que operan con horarios de paso fijos para cada paradero, de modo que los usuarios conocen de antemano la hora exacta de su arribo.

Si bien ya no existen como una denominación oficial, es importante traer a colación los servicios de buses “clon” del Metro que consistían en rutas de buses que realizaban recorridos en la superficie paralelos a los de las distintas líneas del Metro de Santiago e incluso, se detenían solamente en las paradas equivalentes. Estos servicios fueron diseñados para enfrentar la gran saturación de las líneas del Metro durante los cambios operacionales que se dieron con la entrada del Transantiago [100]. Hoy en día, los servicios “clon” son puestos en operación ocasionalmente cuando se presentan problemas con la operación de alguna de las líneas del metro [101] [102], y además,

existen servicios normales que derivaron de servicios “clon” y complementan el servicio de Metro tal como se muestra en la Figura B-5.

**Figura B-5:** Ejemplos de servicios de buses operativos actualmente, derivados de servicios “clon” del Metro de Santiago



Fuente: Mapa de servicios descargable de la página oficial del DTPM [97], fondo en Google Earth [Último acceso: 18 02 2020].

### Infraestructura:

Una vez que se han revisado los servicios de transporte público, es conveniente dar un vistazo a la infraestructura básica que permite la interconexión de los distintos componentes del sistema. Tal como se explicó anteriormente, Red Metropolitana de Movilidad ofrece integración tarifaria en todas sus modalidades de transporte. Para garantizar que esto se traduzca en una integración física real, en Santiago de Chile se han implementado diversos tipos de estaciones que permiten a los usuarios hacer transbordos entre las líneas del Metro, MetroTren, buses urbanos e interurbanos. Estas estaciones se clasifican de la siguiente manera [103]:

- **Punto de parada:** es el paradero más simple y consta de una señal de parada, el andén y posiblemente un refugio. En este tipo de paradero los usuarios pueden acceder a las diferentes líneas de buses. Según su tamaño, pueden encontrarse refugios simples y refugios corredores [104].
- **Zonas pagas:** son puntos de parada con refugio y que, además, cuentan con un validador electrónico que permite a los usuarios hacer el pago antes de abordar

los buses. Esto con el objetivo de minimizar el tiempo de abordaje. Que un punto de parada tenga zona paga depende de su afluencia de buses y pasajeros [105].

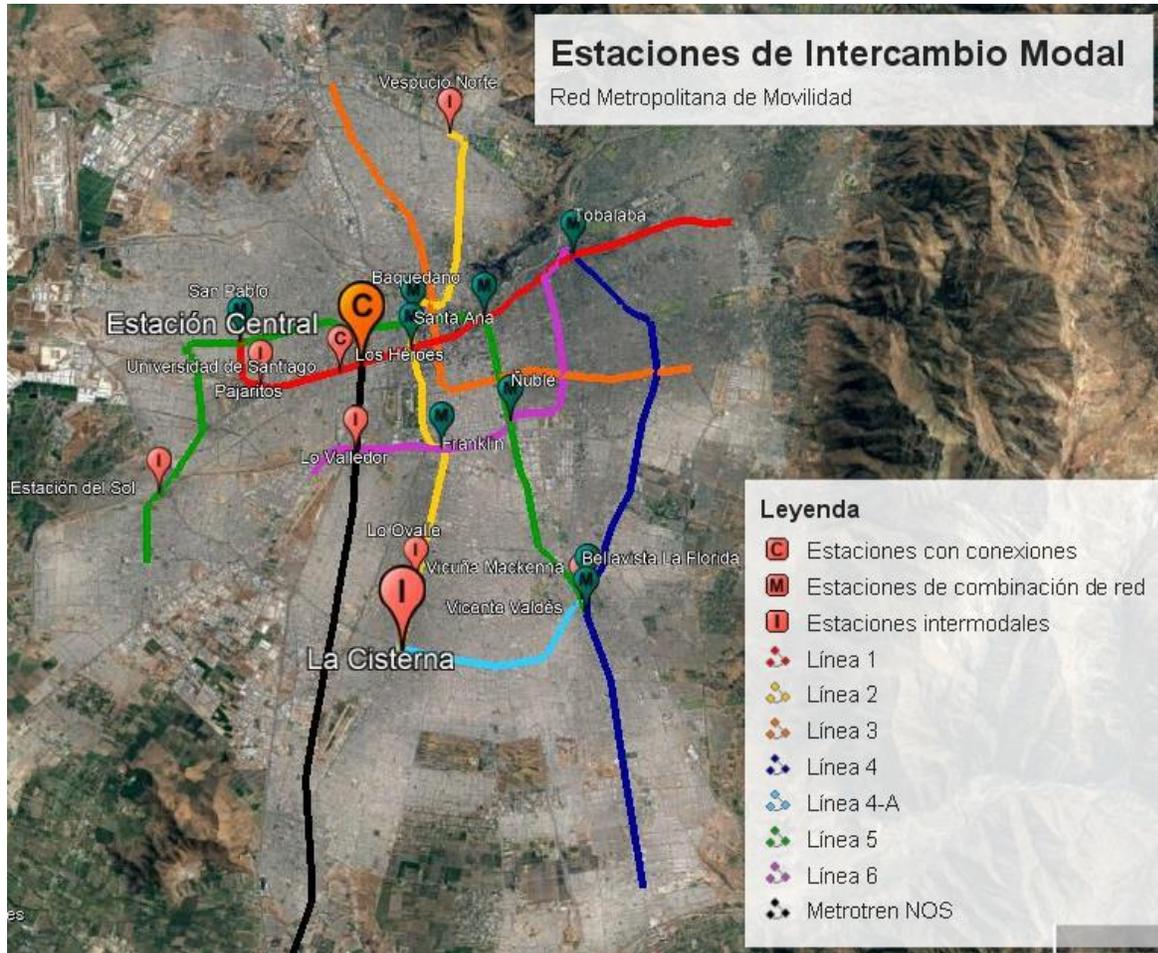
- **Estaciones de transbordo:** son un sistema integrado de andenes en vía pública con las facilidades necesarias para el desplazamiento peatonal de usuarios que deseen intercambiar entre distintas líneas de buses u otros modos de transporte [106].
- **Estaciones de Metro:** Santiago de Chile cuenta con 118 estaciones para el servicio de Metro, la mayoría subterráneas. A su vez, la mayor parte de las estaciones de Metro posee estaciones de transbordo para el intercambio de pasajeros con los servicios de buses [107].
- **Estaciones de intercambio modal (EIM):** son edificios que pueden permitir el intercambio entre los servicios de metro, tren, bus urbano, bus interurbano, taxi, colectivos y/o automóviles [108].

Merecen especial atención las EIM como ejes integradores de los distintos modos de transporte, pertenezcan estos o no a la Red Metropolitana de Movilidad. En la Figura B-6 se muestra su ubicación respecto a las líneas de Metro. El DTPM clasifica las EIM en tres grupos [108]:

- **Estaciones de combinación de red:** son aquellas que permiten realizar intercambios entre las distintas líneas del Metro. Algunas de estas estaciones son Tobalaba, Baquedano, San Pablo, etc.
- **Estaciones con conexiones:** en este grupo figuran dos estaciones, la Estación Central, en la cual es posible conectar con el servicio de Ferrocarriles Estación Central (EFE) y con los buses del Terminal San Borja. La otra estación es Universidad de Santiago, donde existe conexión directa con los servicios interurbanos del Terminal Alameda.
- **Estaciones intermodales - interconectadas:** estas son las estaciones de intercambio modal en las cuales es posible conectar con los servicios de la Red

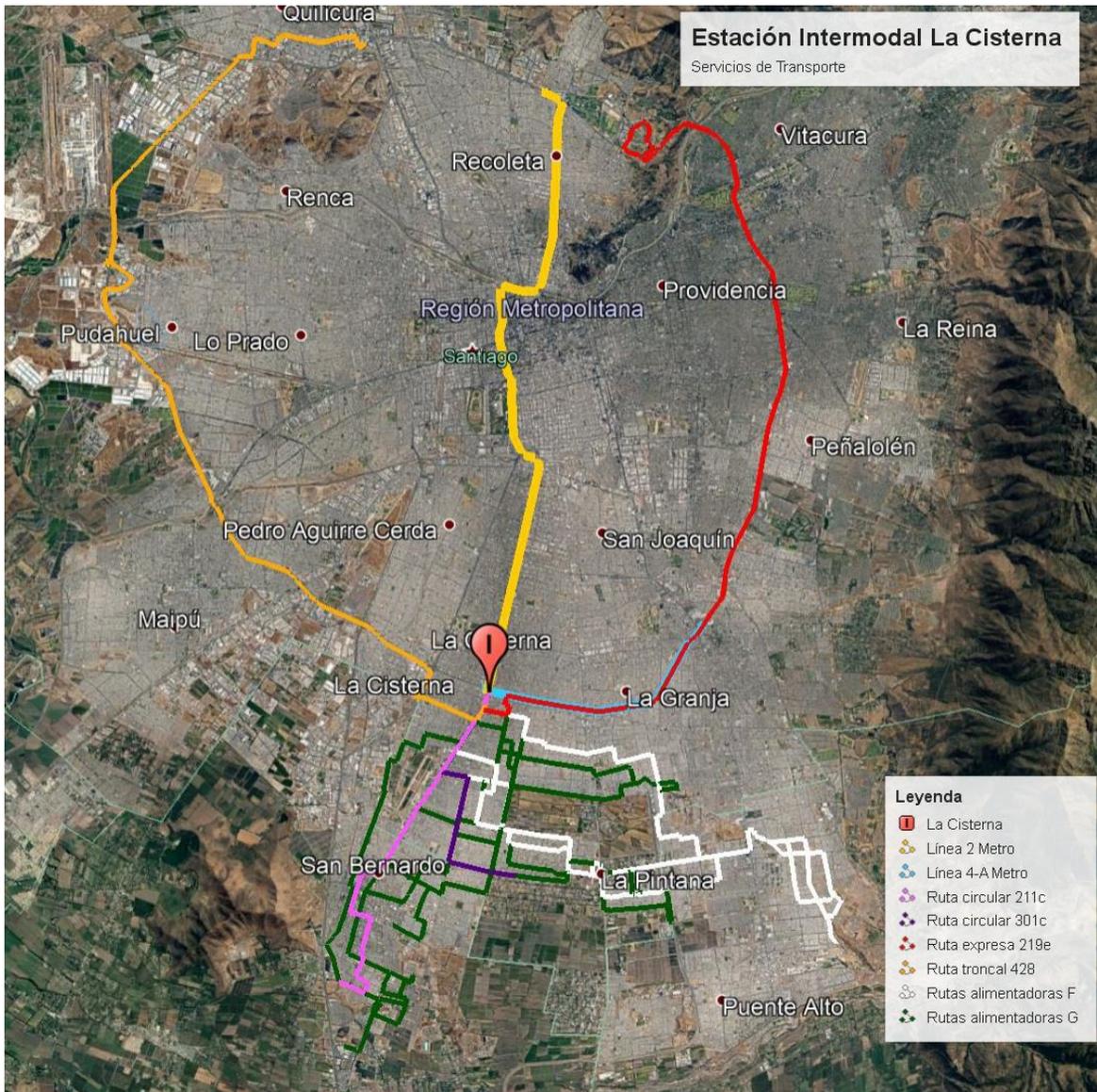
Metropolitana de Movilidad y otros modos de transporte. Destacan las estaciones Bellavista La Florida, Lo Ovalle, Lo Valledor, La Cisterna, entre otras.

**Figura B-6:** Ubicación de las EIM en Santiago de Chile



Fuente: Página oficial del DTPM [108], fondo en Google Earth [Último acceso: 22 02 2020].

En este punto, la estación La Cisterna amerita una mención especial dada su envergadura como obra de infraestructura fundamental dentro del sistema de transporte de Santiago. Esta EIM está ubicada en la zona sur de la ciudad y presta sus servicios de transporte a las comunas de San Bernardo, El Bosque, La Pintana, La Cisterna, San Ramón y La Granja.

**Figura B-7:** Estación Intermodal La Cisterna y sus servicios de transporte

Fuente: Mapa de servicios descargable de la página oficial del DTPM [97] y página oficial de Sociedad Concesionaria Intermodal La Cisterna [109], fondo en Google Earth [Último acceso: 22 02 2020].

La estación consiste en un edificio de cinco niveles distribuidos del siguiente modo, de abajo hacia arriba [110]:

- Tercer subterráneo: Conexión con la mesanina de la Línea 2 del Metro.
- Segundo subterráneo: Plataforma de buses urbanos.
- Primer subterráneo: Plataforma de buses alimentadores.

- Primer piso en superficie: Plataforma de buses interurbanos y área comercial.
- Segundo piso en superficie: Estacionamientos y taxis colectivos.

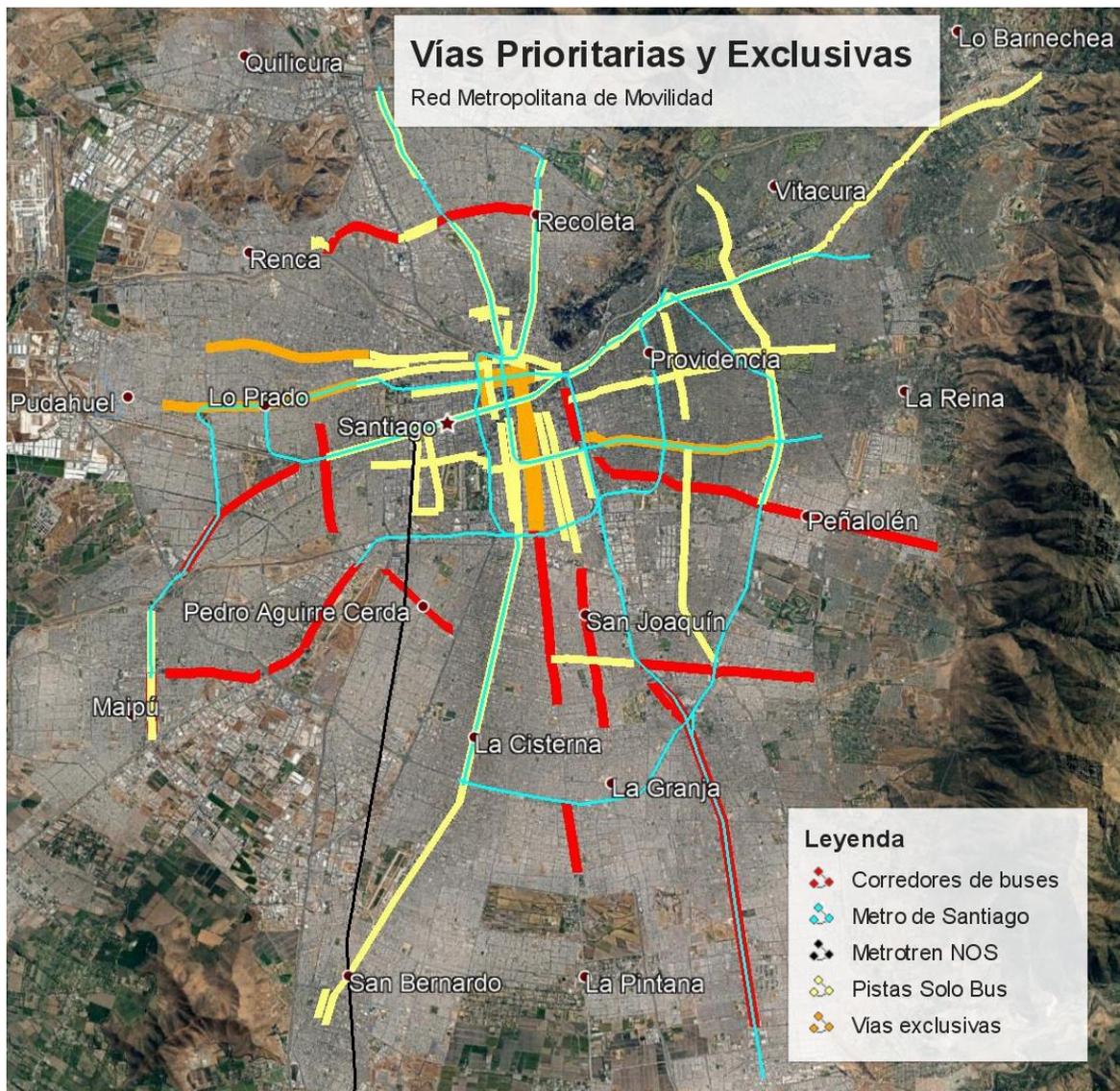
También existe un acceso directo a la estación de metro La Cisterna, en la cual se conectan las líneas 2 y 4-A. El mapa con los servicios de transporte que operan en la EIM La Cisterna puede observarse en la

Figura **B-7**. Adicionalmente, La Cisterna incorpora un centro comercial con locales, tales como bancos, restaurantes, de servicios y tiendas [111]. El área total de la estación es de 50.000 m<sup>2</sup>, de los cuales 7.193 m<sup>2</sup> corresponden a locales arrendables.

Finalmente, culminando con el estudio de caso de la ciudad de Santiago, vale la pena revisar el sistema de vías prioritarias y exclusivas que se ha implementado para el servicio de buses, ver mapa en la Figura B-8. Es remarcable que varias de estas vías sean paralelas a las líneas del Metro de Santiago.

Estos corredores prioritarios y exclusivos se clasifican así [112]:

- **Vías exclusivas:** vías en las que, en horarios preestablecidos, circulan solamente buses de transporte público y taxis con o sin pasajeros. Su principal función es disminuir los tiempos de ciclo de las rutas de buses en horas de alta demanda.
- **Pistas Solo Bus:** carriles de uso preferencial para buses de transporte público y taxis con pasajeros a bordo. Se ubican al costado derecho de la vía y funcionan las 24 horas del día, los 365 días del año. Su función es disminuir los tiempos de ciclo de las rutas de buses de manera general.
- **Corredores de buses:** son corredores segregados de uso exclusivo para determinados buses de transporte público y se encuentran generalmente en la calzada central de la vía. Su objetivo es disminuir los tiempos de ciclo de ciertas rutas mediante la implementación de sistemas tipo BRT.

**Figura B-8:** Vías prioritarias y exclusivas de la Red Metropolitana de Movilidad

Fuente: Mapas de vías prioritarias y exclusivas descargables de la página oficial de Fiscalización Transportes [112], fondo en Google Earth [Último acceso: 22 02 2020].

## **B.1 Lima, Perú**

### **Estructura administrativa:**

Lima es la capital del Perú, su principal centro económico y sede del poder político nacional. Su PIB constituyó el 49,46% del total del país en 2018 [113]. Para efectos de esta investigación, se tendrá en cuenta el área denominada Lima Metropolitana, constituida por los centros urbanos de la Provincia de Lima (43 distritos) y la Provincia Constitucional del Callao (7 distritos), ambas con autonomía de gobierno a nivel regional, ya que no forman parte de ninguno de los departamentos del país [114]. Estas dos provincias son unidades administrativas diferenciadas, pero cuyos límites urbanos se han hecho difusos debido a la expansión del núcleo original de Lima. En la práctica, conforman una conurbación como puede verse en la Figura B-9.

La Municipalidad Metropolitana de Lima, en cabeza de su alcalde elegido por votación popular, es el ente encargado de la administración metropolitana de la Provincia de Lima y sus 43 distritos. Si bien, cada uno de estos distritos cuenta con su propia municipalidad distrital, estas municipalidades están obligadas a actuar en coordinación con la Municipalidad Metropolitana [115]. Por su parte, El Callao cuenta con un gobierno regional y uno municipal, ambos de elección popular. El poder ejecutivo recae en el Gobierno Regional del Callao [116].

La “Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao” es el ente que gestiona el transporte público del área metropolitana y está adscrita al Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú [117]. Cuenta con autonomía administrativa, funcional y financiera. Su Consejo Directivo está conformado por dos representantes del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, uno del Ministerio de Economía, uno del Ministerio de Vivienda, y cuatro miembros propuestos por las municipalidades de las Provincias de Lima y El Callao. De este modo, la administración de este órgano queda compartida entre el Gobierno Central del Perú y las autoridades regionales del territorio.

### **Geografía:**

A diferencia del caso del Gran Santiago, Lima Metropolitana no corresponde a un único núcleo urbano con forma definida, sino que constituye un vasto territorio con poblados diseminados a lo largo de la provincia de Lima, y que, a pesar de ser formalmente parte

de la ciudad, no necesariamente existe continuidad urbana entre estos centros de población.

**Figura B-9:** Lima Metropolitana y ampliación del núcleo urbano principal.

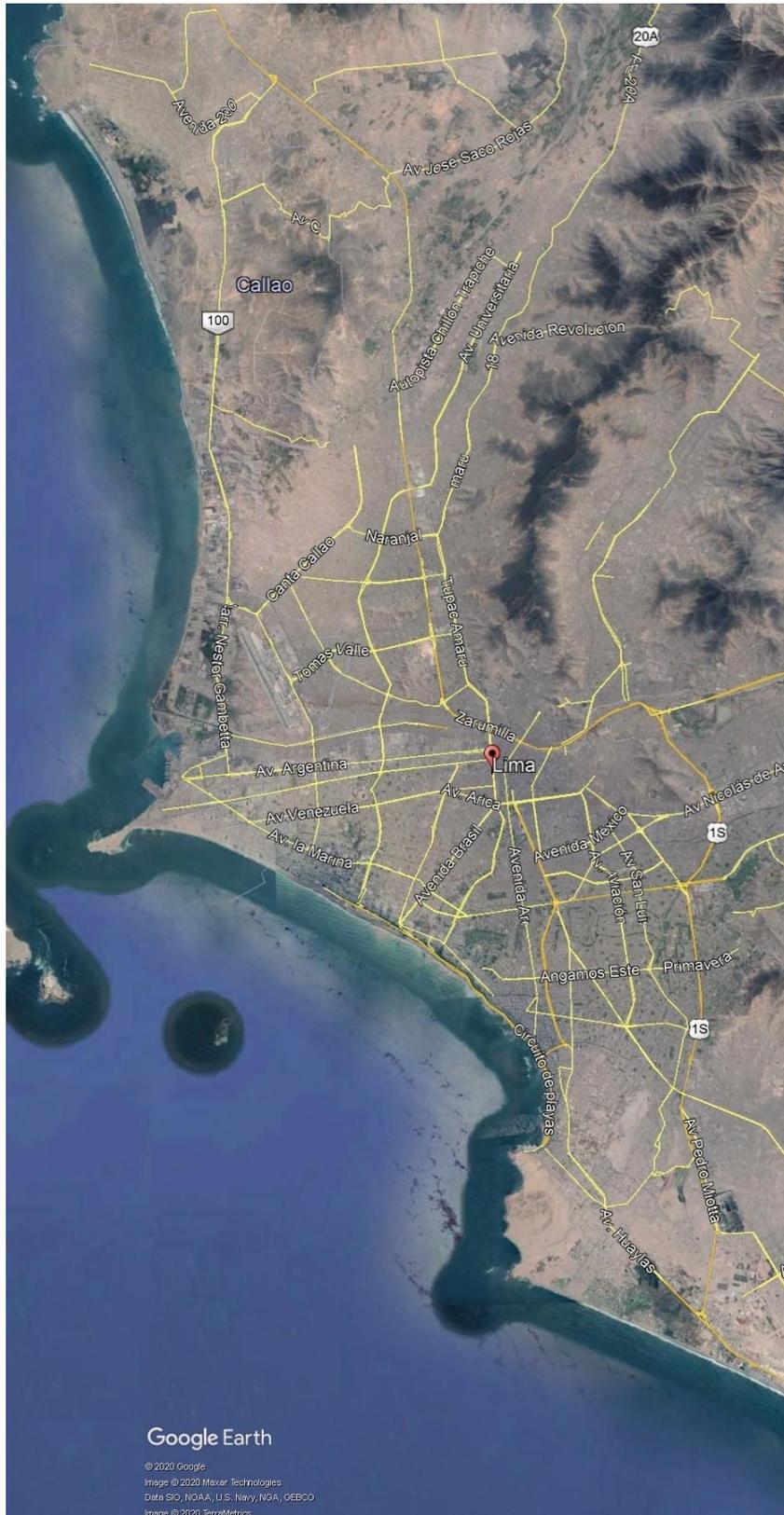


Fuente: Tomada de Google Earth [Último acceso: 20 03 2020].

Como puede observarse en la Figura B-9, existe un núcleo urbano principal, rectángulo rojo a la izquierda, que es significativamente más pequeño que el área metropolitana total delimitada por la línea gris. Aquí es importante aclarar que la cobertura del sistema de transporte público se extiende por toda Lima Metropolitana [117], pero que gran parte de la operación está concentrada en el núcleo urbano principal [65].

La Figura B-10 muestra una ampliación de este núcleo urbano principal. Se observa que se trata de una larga franja costera relativamente delgada, dentro de la cual está totalmente enmarcada la Provincia del Callao.

Figura B-10: Núcleo urbano principal de Lima Metropolitana.



Fuente: Tomada de Google Earth [Último acceso: 20 03 2020].

A nivel micro y medio, no existe una tendencia general que defina la geometría del trazado de las calles. Esta irregularidad en el tejido urbano es una consecuencia del desordenado desarrollo que tuvo la ciudad durante el siglo XX, el cual se ve reflejado en la existencia de las denominadas “Barriadas de Lima” [118]. A nivel macro, se podría considerar que el núcleo urbano principal de Lima Metropolitana es una franja lineal, en la cual tres grandes conjuntos de viaductos continuos recorren completamente la ciudad de norte a sur. Además, existen múltiples ramales (occidente a oriente) que comunican esta franja costera con las barriadas establecidas en las faldas de los cerros de la periferia.

**Sistema de transporte:**

El Sistema Integrado de Transporte de Lima y Callao es el sistema de transporte público que actualmente (marzo de 2020) está implementándose en Lima Metropolitana [117]. Su administración recae sobre la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao. Al momento de escribir estas líneas, aún no existe integración entre todos los modos de transporte de la ciudad [119]. El servicio BRT “Metropolitano”, incluyendo las rutas de los “Corredores Complementarios”, y el Metro de Lima cuentan cada uno con su propia tarjeta inteligente de transporte, pero no existe interoperabilidad entre estos dos sistemas. Mientras tanto, en las rutas tradicionales e informales de buses se sigue usando el dinero en efectivo como medio de pago [119]. En el BRT Metropolitano la tarifa permite el uso del servicio BRT, más un servicio alimentador al inicio del viaje y otro al final, dentro de una ventana de tiempo de 122 minutos [68]. Tanto en el Metro [120] como en el BRT Metropolitano [121] existen tarifas diferenciales para estudiantes y personas con discapacidad.

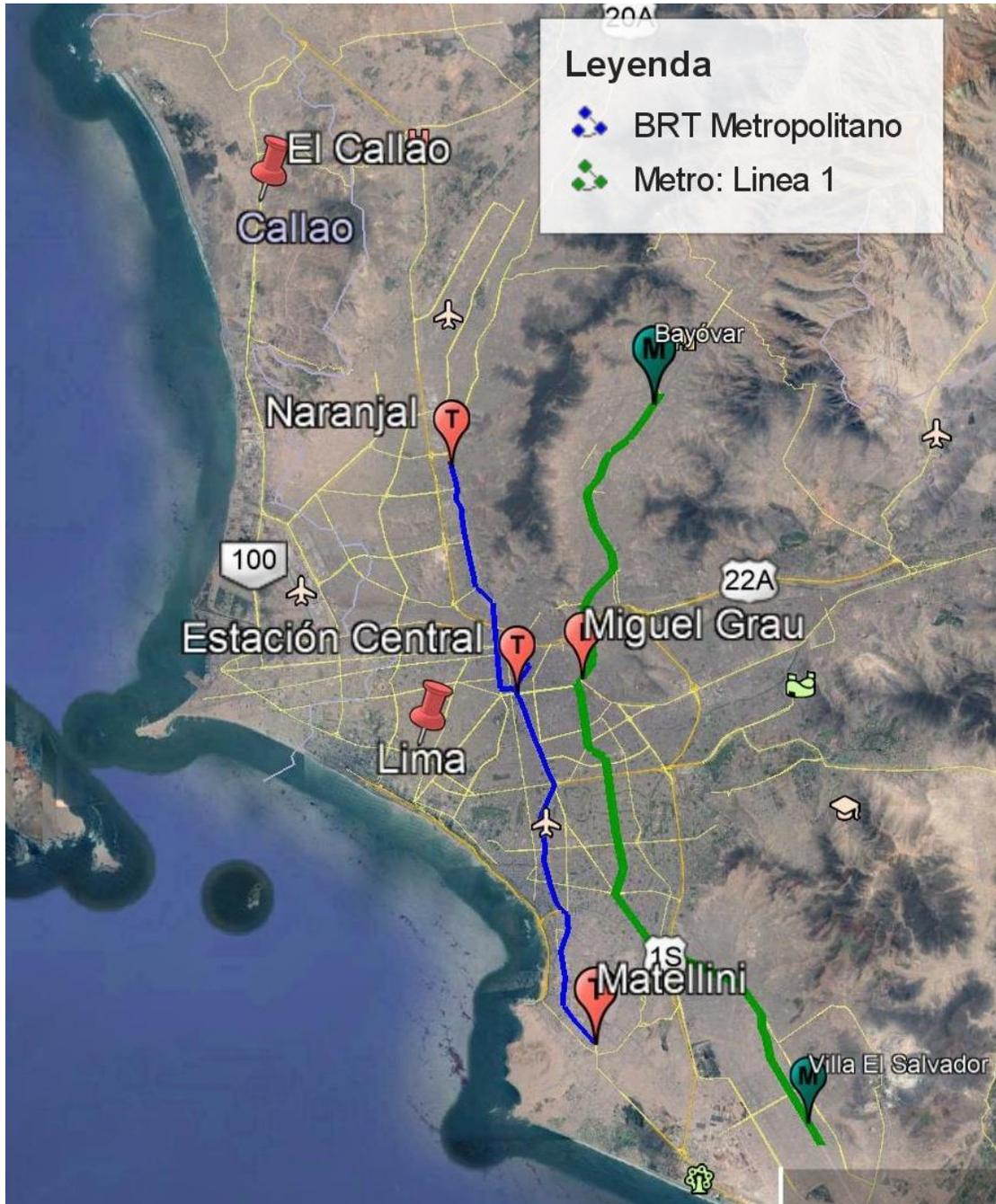
**Descripción de los servicios de transporte:**

El sistema de transporte público de Lima Metropolitana se constituye de los siguientes modos de transporte:

**Metro de Lima:** actualmente tiene una línea en operación, aunque existen otras cinco en construcción o proyectadas [63]. La línea 1 del Metro conecta la estación Villa El Salvador en el sur de la ciudad, con la estación Bayóvar en el noreste. Durante su recorrido sirve 26 estaciones, de las cuales 20 corresponden a viaducto elevado y 6 son

estaciones a nivel [122]. La línea 1 discurre a lo largo del sector oriental de la franja costera correspondiente al núcleo urbano principal, tal como se ilustra en la Figura B-11.

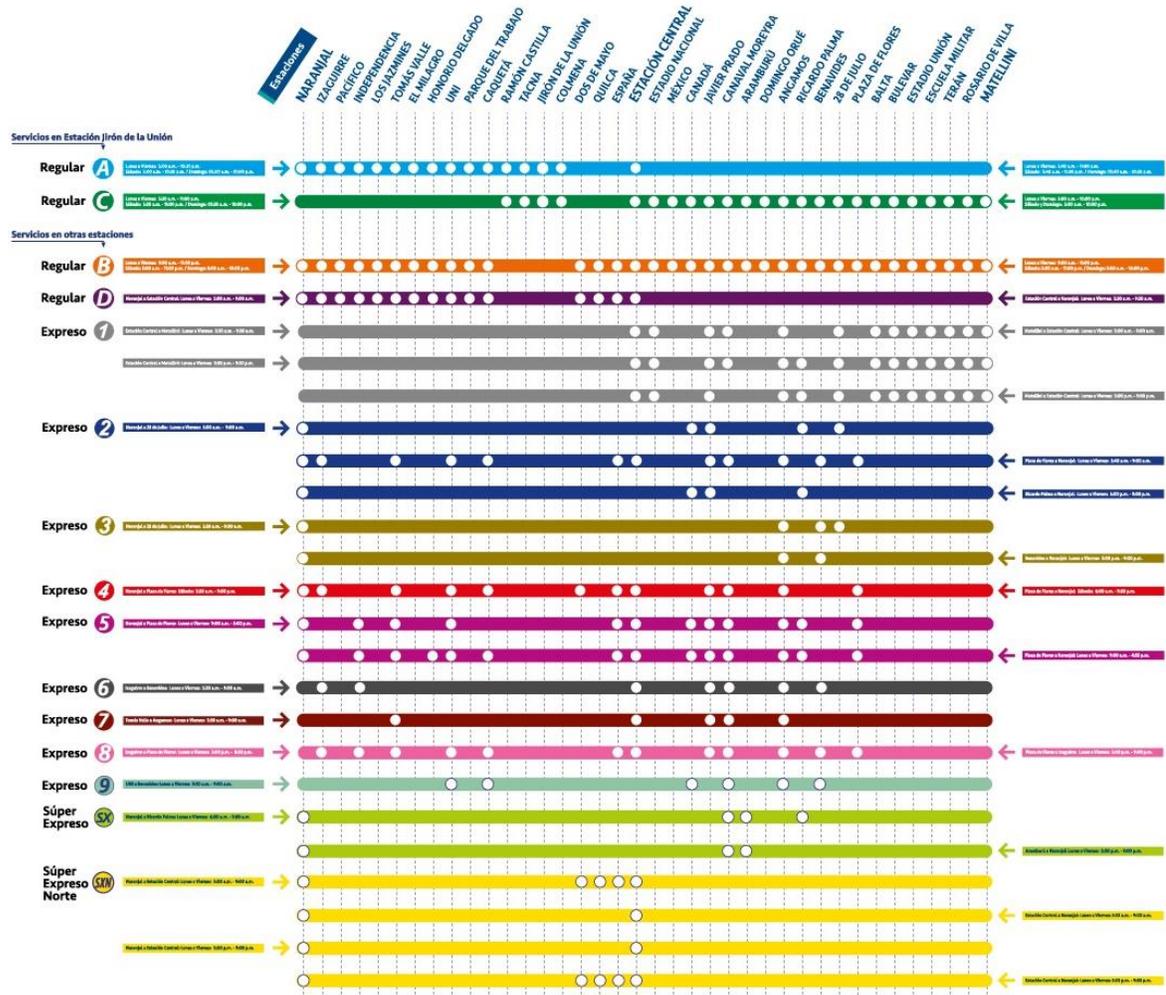
**Figura B-11:** Línea 1 del Metro de Lima y BRT Metropolitano.



Fuente: Mapa de estaciones de la página oficial de Línea 1 Metro de Lima [122] y Mapa de rutas troncales de la página oficial del Metropolitano de Lima [65], fondo en Google Earth [Último acceso: 22 03 2020].

**Metropolitano de Lima:** es el servicio BRT de la ciudad, e incluye el sistema de rutas troncales y alimentadoras. En su componente troncal, consiste en una línea con carril segregado y su recorrido es paralelo a la línea 1 del Metro, pero más hacia el oeste, atravesando el centro del núcleo urbano principal, como se ve en la Figura B-11. Se considera dividido en tres tramos: norte, central y sur [65]. En el tramo central, se bifurca en dos segmentos desde la Estación Central hasta la Plaza Castilla. Esta bifurcación se encuentra en pleno centro histórico de la ciudad.

**Figura B-12:** Servicios troncales Metropolitano de Lima



Fuente: Imagen tomada de la página oficial del Metropolitano de Lima, sección rutas troncales [65], [Último acceso: 24 03 2020].

La Figura B-12 muestra el diagrama de los servicios troncales del Metropolitano de Lima, junto a sus sentidos de operación, horarios y puntos de parada. Teniendo en cuenta los objetivos de la presente investigación, se analizará la configuración de estas rutas troncales.

En primer lugar, es necesario mencionar que existen tres lugares claves dentro de la línea troncal. En el norte, el Terminal Naranjal como punto de partida de los servicios de norte a sur; en la mitad, la Estación Central como principal estación del sistema y punto de intercambio; y en el sur, el Terminal Matellini como de partida de sur a norte [61]. Los terminales son el punto de integración entre rutas alimentadoras y troncales.

En segundo lugar, en la Figura B-12 se evidencia la existencia de tres tipos de servicios troncales:

- **Servicios Regulares:** son aquellos que se detienen en todas las estaciones a su paso. Existen 4 servicios regulares. De ellos, solo el servicio B atraviesa la troncal de punta a punta, tomando la variante de la estación España en su paso por el centro de Lima. Por su parte, los servicios A y D parten desde el norte y solo llegan hasta la Estación Central, en la cual retornan. Se diferencian en que el primero de estos servicios toma la variante de la estación Jirón de la Unión, mientras que el segundo pasa por la estación España al pasar por el centro de la ciudad y solo opera en la hora punta de la mañana. Finalmente, el servicio C parte desde el sur de la ciudad retornando en la estación Ramón Castilla, en el centro de Lima.
- **Servicios Expresos:** son aquellos que se detienen solo en algunas estaciones determinadas y en general, solo funcionan en horas punta. Existen 9 servicios expresos. El expreso 1 es el único que cubre todo el tramo sur de la troncal y más bien, omite pocas paradas en su recorrido hasta la estación central. Los expresos 2, 4, 5 y 8 son servicios bidireccionales que empiezan su recorrido en el norte de la ciudad, conectan con el centro y llegan hasta la estación Plaza de Flores, ubicada a siete estaciones del Terminal Matellini en el sur. Su diferencia radica en los horarios de operación, el expreso 2 opera en horas punta entre semana, el expreso 4 opera solo los sábados, el expreso 5 opera en hora valle en días

hábiles y el expreso 8 opera solamente en hora punta de la tarde. Los expresos 6, 7 y 9 son servicios unidireccionales de norte a sur que solo operan en hora punta de la mañana. La diferencia entre ellos radica en sus estaciones de origen en el norte de la troncal.

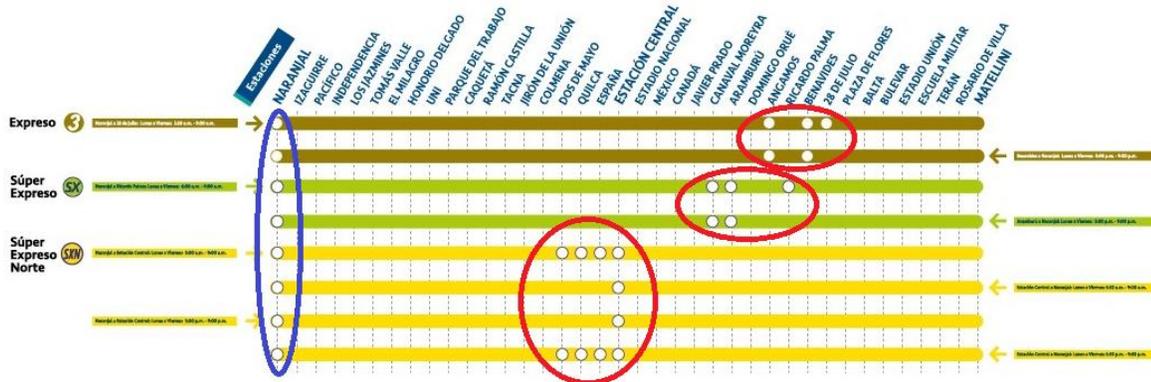
- **Servicios Superexpresos:** son aquellos que se detienen en unas muy pocas estaciones en su origen, pudiendo tener varias paradas en su destino, transitan sin detenerse en puntos intermedios y solo circulan en horas punta. Como tal vez se haya notado, en el punto anterior no se hizo mención del expreso 3. Esto, porque en la práctica, este servicio se asemeja más a un superexpreso unidireccional que se origina en el norte de la ciudad en horas de la mañana, cambiando su sentido en la hora punta de la tarde. De una manera similar funciona el superexpreso SX, diferenciándose del expreso 3 en sus estaciones de destino en el tramo sur. Por su lado, el superexpreso bidireccional SXN cubre el tramo norte de la troncal, desde el Terminal Naranjal hasta la Estación Central. Ninguno de estos servicios superexpresos tiene cobertura hasta el Terminal Matellini en el extremo sur.

Partiendo de esta breve descripción de los tipos de servicios troncales, es conveniente destacar algunas características relativas a su diseño. Por un lado, es notable que la mayoría de las rutas tiene un diseño radial (desde un extremo, hasta el centro o un poco más allá) y que en la hora punta AM predominan las rutas desde el norte al centro/sur de la troncal. El investigador supone que esto refleja que la demanda está desbalanceada y que en el norte se origina, cada mañana, la mayor parte de los viajes hacia los sectores atractores en el centro de la ciudad.

Por otro lado, al igual que en el caso de Santiago de Chile, se ha constatado la existencia de servicios superexpresos que en horas punta cargan pasajeros desde una estación de origen y no vuelven a detenerse hasta llegar a los puntos atractores de viajes. En Lima estos servicios han sido diseñados para servir diferentes zonas atractoras, partiendo desde el Terminal Naranjal. La Figura B-13 ilustra este concepto. Además, en esta figura puede observarse otra característica interesante, y es que las paradas de un servicio de este tipo no tienen que ser necesariamente las mismas en la mañana y la noche, o en la ida y la vuelta. Ninguno de los tres servicios mostrados es simétrico en sus paradas. Sin

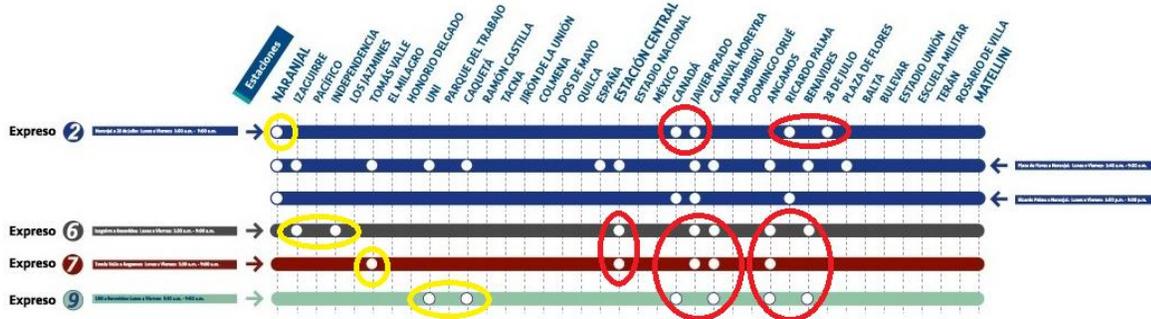
embargo, esta característica es más evidente en el servicio SXN, el cual busca llevar pasajeros, desde un solo origen en el norte, a varias estaciones de la zona central de la ciudad durante la hora punta de la mañana, para luego retornar rápidamente y empezar un nuevo recorrido. En la hora punta de la tarde, este servicio superexpreso cambia su configuración de paradas por sentido, buscando llegar rápidamente a la Estación Central, para luego retornar realizando varias paradas consecutivas que permitan abordar a los pasajeros de las estaciones de la zona centro.

**Figura B-13:** Servicios Superexpresos Metropolitano de Lima.



Fuente: Imagen modificada de la Figura B-12, la cual fue tomada de la página oficial del Metropolitano de Lima, sección rutas troncales [65], [Último acceso: 24 03 2020].

**Figura B-14:** Servicios Expresos hora punta AM Norte-Sur Metropolitano de Lima.



Fuente: Imagen modificada de la Figura B-12, la cual fue tomada de la página oficial del Metropolitano de Lima, sección rutas troncales [65], [Último acceso: 24 03 2020].

En cuanto a los servicios expresos, aquellos que operan durante la hora punta AM en el sentido norte a sur, revelan su diseño si son analizados en conjunto, como se muestra en la Figura B-14. Lo primero para notar es que solo uno de estos servicios expresos, la ruta

2, comienza su recorrido en el Terminal Naranjal. En tanto, las rutas 6, 7 y 9 comienzan sus recorridos en estaciones intermedias de forma escalonada. Esto ha de permitir una mejor distribución de los pasajeros que abordan en cada una de estas estaciones. En cuanto a sus destinos, tal como se observa en la figura, estos cuatro servicios comparten algunas de sus estaciones de llegada y cubren, aproximadamente, la misma zona atractora de viajes.

**Corredores Complementarios:** es el tercer componente del sistema de transporte público de Lima. Cada corredor complementario es un grupo de rutas que transitan por un corredor específico conformado por una o varias avenidas principales de la ciudad. Estas rutas son operadas con buses y, en teoría, los concesionarios que las operan tienen la exclusividad sobre la oferta de transporte público en estos corredores [123]. Los Corredores Complementarios deben su nombre a que se consideran un complemento del Metro y del BRT Metropolitano. El acceso al BRT Metropolitano y a los buses de los Corredores Complementarios puede realizarse con la misma tarjeta de transporte inteligente, no siendo así en el caso del Metro [119].

La Figura B-15 muestra el mapa de las rutas de los Corredores Complementarios para julio de 2019. Existen cinco corredores, cada uno identificado con un color diferente [123]:

- **Corredor Morado:** se trata de un corredor radial que comunica el noreste con el centro geográfico del núcleo urbano. En una buena parte de su recorrido los buses circulan bajo el viaducto elevado del Metro y por lo tanto, el corredor complementa al componente férreo. Este corredor posee cinco rutas.
- **Corredor Amarillo:** este corredor atraviesa buena parte de la ciudad de norte a sur y su eje principal es la Vía Panamericana. Dado que sigue el trazado de esta vía, no ingresa al centro histórico de la ciudad, sino que se desvía hacia el este rodeando la zona céntrica. Está conformado por una única ruta.
- **Corredor Rojo:** el Corredor Rojo es el único componente del sistema de transporte actual, que atraviesa totalmente el núcleo urbano principal de oeste a este, dividiéndose en varios ramales que sirven a los barrios ubicados en los

cerros del este de la ciudad. Este corredor se cruza tanto con el Metro como con el BRT Metropolitano y, en caso de darse la plena integración tarifaria entre estos sistemas, podría jugar un papel fundamental como alimentador e integrador de estas dos líneas de transporte masivo. Posee 6 rutas.

**Figura B-15:** Mapa de los Corredores Complementarios de Lima a 25 de julio de 2019.



Fuente: Imagen sin modificar tomada de Wikipedia [124], aportada por el usuario Alexis Eco [125], bajo licencia Creative Commons [126], [Último acceso: 26 03 2020].

- **Corredor Azul:** es el corredor que complementa al BRT Metropolitano en su tramo sur. Aunque no transitan por las mismas avenidas, su trazado es paralelo y

su zona de influencia se superpone. A su paso por el centro de la ciudad, este corredor se encuentra a solo 250 metros de la Estación Central. Después de este punto, su recorrido continúa hacia el noreste por aproximadamente 5 Km., alejándose de la influencia del tramo norte de la troncal BRT. Cuatro rutas conforman este corredor.

- **Corredor Verde:** es el corredor más corto. Al igual que el Corredor Rojo, su recorrido es de oeste a este, pero sin llegar a atravesar toda la ciudad. De hecho, finaliza (o empieza según quiera verse) en la Estación Grau del Metro de Lima. Existe una única ruta en este corredor.

#### **Infraestructura:**

Tal como se mencionó anteriormente, el Metro de Lima discurre sobre un viaducto elevado en la mayor parte de su recorrido, con 20 estaciones elevadas y 6 a nivel de suelo. Sin contar las estaciones del tramo norte, en donde el Metro y el Corredor Morado comparten corredor vial, existen dos estaciones del Metro que tienen conexión por proximidad con los Corredores Complementarios. Es el caso de las estaciones Miguel Grau (Corredor Verde) y La Cultura (Corredor Rojo) [120].

Por el lado del BRT Metropolitano destacan, en primer lugar, los terminales Naranjal y Matellini como puntos extremos del corredor troncal. Allí desembocan las rutas alimentadoras y sus pasajeros pueden intercambiar con las rutas troncales. En el Naranjal operan 17 rutas alimentadoras, mientras que en Matellini lo hacen 5 rutas [127]. En estos terminales existen andenes separados para la operación de buses troncales y alimentadores [128].

Adicionalmente, en el Metropolitano existen 36 estaciones intermedias que han sido adecuadas para el servicio en el sistema BRT. Las estaciones de los centros históricos de Lima y Barranco tienen diseños flexibles que les permiten adaptarse a su especial entorno [129].

Finalmente, la Estación Central merece una mención propia. Se trata de una estación subterránea de tres niveles en la zona de influencia del centro histórico de Lima. Su función es servir como punto de interconexión entre los tramos norte y sur de la troncal,

así como punto de transbordo entre distintas rutas del BRT y una ruta alimentadora que conecta por proximidad con la estación Gamarra del Metro. Además, es posible el intercambio por proximidad con los corredores Azul y Verde. El primer nivel de la estación corresponde a la zona de superficie donde se encuentran la Plaza Grau y la Alameda de los Héroes; el segundo nivel contiene la infraestructura peatonal y vehicular, las plataformas de abordaje y una zona comercial; en el tercer nivel se encuentran las plazas que conectan con los cuatro los accesos principales y el área de máquinas [129].

## **C. Anexo: Detalles de las entrevistas a expertos nacionales e internacionales**

Los expertos consultados, a quienes se les agradece enormemente por sus valiosos aportes, se listan a continuación en el mismo orden cronológico en el que fueron entrevistados:

- Otto Sarmiento, ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia y magíster en Ingeniería de la misma universidad, quien cuenta con una gran experiencia en la dirección y gerencia de empresas operadoras de BRT en Colombia y Perú. Al momento de realizarse la entrevista, el ingeniero Sarmiento se desempeña como gerente general del Grupo Express del Perú SAC.
- Fabio Gordillo, ingeniero industrial de la Universidad de los Andes, magister en Transporte y magister en Tecnología y Política del MIT, quien cuenta con una amplia experiencia en el campo de los Sistemas Inteligentes de Transporte. Al momento de realizarse la entrevista, el ingeniero Gordillo se desempeña como fundador y gerente general de la consultora GSD Plus S.A.S. en Bogotá.
- Javier Hernández López, abogado especialista en Gestión Pública e Instituciones Administrativas de la Universidad de Los Andes, quien cuenta con una gran experiencia en la asesoría y dirección de entidades públicas y privadas del sector de la movilidad. Particularmente, el abogado Hernández fue unas de las cabezas de la estructuración del SITP de Bogotá a comienzos de la década del 2010, y posteriormente fue viceministro de Infraestructura.
- Darío Hidalgo, ingeniero civil de la Universidad de los Andes, magíster y doctor en Ingeniería de Transporte de la Universidad Estatal de Ohio, quien cuenta con gran reconocimiento y experiencia como consultor y asesor internacional en temas de

movilidad y transporte. Al momento de realizarse la entrevista, se desempeña como consultor senior del Centro WRI Ross de Ciudades Sostenibles y profesor de las Universidades de los Andes, del Rosario y Externado de Colombia.

- Ana Luisa Flechas, ingeniera de transporte y vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, y doctora en Optimización y Explotación de Sistemas de Transporte de la Universidad Politécnica de Valencia, quien cuenta con gran experiencia como consultora y asesora en temas de movilidad, política y transporte, y como docente en la Universidad Nacional de Colombia. Además, se desempeñó como Secretaria de Movilidad de la ciudad de Bogotá entre enero de 2012 y febrero de 2013.
- Angelica Castro, ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería y magíster en Planeación de Transporte e Ingeniería de la Universidad de Leeds, quien cuenta con una gran experiencia en planeación e implementación de proyectos de transporte público en América Latina. Particularmente, la ing. Castro fue gerente de TransMilenio S.A. entre agosto de 2005 y diciembre de 2007, y al momento de realizarse la entrevista se desempeña como directora internacional en Transconsult S.C.
- Manuel Salazar, ingeniero civil de la Universidad de los Andes, DESS en Desarrollo y Urbanismo de la Universidad de Grenoble y magíster en Estudios Políticos de la Universidad Javeriana, quien cuenta con una gran experiencia como consultor y ha dirigido el diseño de sistemas de transporte público de diversas ciudades de Colombia. Particularmente, el ing. Salazar fue uno de los directores de la estructuración del SITP de Bogotá.
- Harvey Scorcia, ingeniero civil de la Universidad de los Andes, magister en Ingeniería Civil de la misma universidad, magister en Transporte y magister en Planificación Urbana del MIT, quien cuenta con una amplia experiencia internacional en el área del transporte, enfocada en las subáreas de planeación urbana, políticas, finanzas, modelación y operación. Además, ha trabajado con diferentes entidades de la banca multilateral y al momento de realizarse la entrevista, el ingeniero Scorcia se desempeña como especialista en transporte urbano de la CAF.

- Luis Willumsen, ingeniero civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile, magíster en Transporte del Imperial College de Londres y doctor en Transporte de la Universidad de Leeds, quien cuenta con una gran experiencia internacional como consultor, planificador e investigador y es una reconocida autoridad en el campo de la modelación de tránsito y transporte. El ing. Willumsen ha dirigido diversos proyectos de planeación de transporte alrededor del mundo y particularmente, lideró la elaboración del diseño operacional de la troncal de TransMilenio.
- Leonardo Cañón, ingeniero civil de la Universidad de los Andes y magíster en Planificación Urbana y Desarrollo del University College de Londres, quien cuenta con una gran experiencia global en movilidad urbana, transporte masivo, modelación de la demanda y regulación de sistemas de transporte. Particularmente, el ingeniero Cañón fue director de operaciones de BRT en TransMilenio S.A. entre enero de 2016 y junio de 2017, y al momento de realizarse la entrevista se desempeña como especialista en Transporte Urbano del Banco Mundial.
- Pedro Szasz, ingeniero mecánico de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo, quien cuenta con una gran experiencia en la planificación e implementación de sistemas BRT a nivel mundial. Particularmente, el ingeniero Szasz fue una de las cabezas en la implementación del sistema TransMilenio durante sus primeros años.
- Germán Lleras, ingeniero civil de la Universidad de los Andes y magister en Transporte y magister en Planeación Urbana del MIT, quien cuenta con una gran experiencia en consultoría de transporte en diversas ciudades de Latinoamérica. Particularmente, el ingeniero Lleras formó parte del equipo inicial de TransMilenio S.A en 1999, y al momento de realizarse la entrevista se desempeña como director regional en el grupo de consultoría Steer.

A continuación se presenta el detalle de cada una de la cinco preguntas y las respuestas conjuntas de los expertos.

## C.1 Sobre las problemáticas del sistema troncal

1.) *Desde el punto de vista de la calidad del servicio al usuario ¿Cuáles considera usted que son las problemáticas más importantes a las que se enfrenta hoy el componente troncal del SITP de Bogotá?*

En el caso de los expertos internacionales de las entrevistas 9 y 11, la pregunta se ha formulado de la siguiente manera:

*Desde el punto de vista de la calidad del servicio al usuario ¿Cuáles considera usted que son las problemáticas más importantes a las que se enfrentan hoy los sistemas BRT en Latinoamérica, y particularmente en el caso de Bogotá?*

Las problemáticas más importantes mencionadas por los expertos se listan a continuación, ordenadas según el número de veces que cada una fue citada, empezando por las más comentadas:

- Sin lugar a dudas, la principal problemática para buena parte de los expertos consultados es la falta de capacidad del sistema troncal, lo que se traduce en altos niveles de ocupación de los buses y largos tiempos de espera para abordar los servicios, siendo esto particularmente cierto para las horas de mayor demanda.
- Casi al mismo nivel y directamente relacionada con el punto anterior se encuentra la alta saturación de las estaciones: tiempos de acceso muy altos y espacio insuficiente para el ingreso, congestión interna de las estaciones y flujos peatonales caóticos en su interior, y falta de puertas y plataformas de abordaje acordes al número de buses y usuarios.
- Apenas un escalón abajo se encuentra la problemática relativa a que el sistema de transporte no fue diseñado con una política que considerara a los usuarios como el eje central del sistema. Esto ha conducido a que la comunicación con ellos no sea integral, existiendo deficiencias en el reconocimiento de sus necesidades, en la recolección de sus aportes como personas que usan día a día

el servicio y en la información que el sistema de transporte les entrega. Además, posiblemente se ha dejado de pensar en la función objetivo de tiempos generalizados del usuario, la cual debe incluir los tiempos de acceso, espera y viaje.

- Otro escalón abajo está situada la problemática de la evasión, la cual se ha vuelto endémica y afecta indiscriminadamente la prestación y el nivel de servicio.
- Al mismo nivel que el punto anterior, fue mencionada la baja confiabilidad de las frecuencias de los servicios, junto con el desequilibrio que se percibe entre la frecuencia en campo y la demanda real de algunas rutas.
- Aún en el mismo nivel, se mencionó el envejecimiento y mal estado de la infraestructura, a pesar de los esfuerzos que se han hecho. A esto se suman posibles deficiencias con el mantenimiento de los buses más antiguos y el hecho de no tener carriles realmente exclusivos en algunos tramos.
- Por otro lado, otra problemática identificada es que el diseño operacional original ha sido sobreexplotado y se ha vuelto muy complejo, esto lo vuelve inestable ante disrupciones y hace que sea difícil controlar la operación.

Otras valiosas respuestas dadas a esta pregunta incluyen:

- El componente troncal no fue concebido como parte de un gran sistema integrado, sino como un sistema por sí mismo.
- Deficiencia en las conexiones entre troncales.
- Falta de seguimiento sistemático a los indicadores de servicio y operación.

## C.2 Sobre las acciones de mejora de corto plazo

2.) *Considerando solamente la red e infraestructura troncal actual ¿Cuáles son las acciones de corto plazo más significativas que se podrían tomar para aliviar las problemáticas enunciadas en el punto anterior?*

En el caso de los expertos internacionales de las entrevistas 9 y 11, la pregunta se ha formulado de la siguiente manera:

*Desde la planeación de transporte, ¿Cuáles son las acciones de corto plazo más significativas que se podrían tomar para aliviar las problemáticas anteriores en Latinoamérica?*

Las acciones de corto plazo más significativas mencionadas por los expertos se listan a continuación, ordenadas según el número de veces que cada una fue citada, empezando por las más comentadas:

- En línea con las respuestas obtenidas para la primera pregunta, una buena parte de los expertos considera que para solucionar las problemáticas mencionadas se requiere de un aumento en la capacidad del sistema y de la mejora en sus niveles de servicio. Para lograrlo se precisa de una mayor inversión con fuentes externas de ingresos, que permita el aumento de la flota y la implementación de nuevos corredores férreos y troncales.
- En segundo lugar, ha sido planteado que es supremamente conveniente realizar un rediseño operacional del sistema. Específicamente, una reorganización de las rutas y su geometría, diseñando con el nivel de detalle que sería alcanzado con un análisis por estaciones, y considerando las interacciones de la troncal con el componente zonal y la alimentación.
- En el siguiente nivel, se ha mencionado que el sistema de transporte debe ser asequible para sus usuarios, no solo financieramente sino que también física y socialmente. Incluso, podría contemplarse la posibilidad de subsidiar el sistema

para garantizar la calidad del servicio, el estado de las infraestructuras y el correcto mantenimiento de la flota.

- En el mismo nivel del punto anterior, se ha expresado que se precisa de una gestión de la demanda que permita aplanar la curva de pasajeros en las horas punta. Esto puede lograrse mediante la flexibilización de los horarios laborales, el cambio de los horarios habituales para estudiantes, el teletrabajo o la migración de usuarios de los servicios troncales hacia el componente zonal del SITP.
- Levemente más abajo se ha ubicado la acción relativa a la ampliación de las estaciones, la mejora en la infraestructura de acceso y la optimización del flujo de usuarios al interior de las estaciones. En este punto también es importante mencionar que se requiere minimizar el número de servicios que paran en la misma puerta de una estación, siendo dos servicios el máximo recomendado por puerta.
- En el mismo nivel que el punto anterior se encuentra lo relativo a mejoras en la infraestructura existente a todo nivel: pavimentos de los carriles de rodamiento, carriles 100% exclusivos, puertas de las estaciones o ampliación de puentes peatonales. Ha sido aconsejado el uso de herramientas que permitan una gestión eficiente y oportuna de la infraestructura.
- Aún en el mismo nivel, se ubica el tema de la cultura ciudadana. Una parte significativa de los expertos coincide en que se necesita de una mejora en los comportamientos de los usuarios. Para ello, el Gobierno debe tomar un rol activo en pro de disminuir la incidencia de comportamientos como la evasión, las ventas ambulantes o el irrespeto a las normas. Además, es necesario que la seguridad dentro del sistema aumente.

Las siguientes acciones fueron mencionadas con la misma frecuencia por parte de los expertos:

- Es indispensable mejorar la frecuencia de los servicios. Por un lado, debería revisarse la programación de estos para evaluar si los intervalos de paso

ofertados satisfacen la demanda de cada ruta. Por otro lado, es necesario hacer uso de herramientas tecnológicas que permitan mejorar el control de la operación para garantizar el oportuno despacho de los servicios y evitar la formación de pelotones de buses de una misma ruta.

- Se requiere trabajar el 100% de las recargas fuera de las estaciones, puesto que el espacio de acceso a ellas es escaso y valioso. Para ello, se propone la implementación de procesos bancarizados adaptables al sistema de transporte y la promoción de procesos de recarga automática.
- Se debe colocar al usuario como el centro de las decisiones que se tomen en el sistema de transporte. Esto también implica que es urgente mejorar la percepción de los usuarios sobre el sistema, para lo cual un proceso de rebranding podría ser muy útil, siempre y cuando los usuarios efectivamente comiencen a experimentar las mejoras.

Otras valiosas respuestas dadas a esta pregunta incluyen:

- Atención rápida de incidentes para evitar rupturas importantes en el servicio y control de intersecciones para evitar bloqueos por tráfico.
- Aumento de la oferta de espacios de estacionamiento para bicicletas.

### **C.3 Sobre un nuevo corredor de transporte masivo**

*3.) Si de usted dependiera ¿Cuál sería el corredor principal por el cual se debería priorizar la construcción de una nueva troncal BRT o línea férrea en Bogotá? Por favor mencionar solo uno suponiendo que la troncal de la Cr. 68 ya ha sido construida.*

En el caso de los expertos internacionales de las entrevistas 9 y 11, la pregunta se ha formulado de la siguiente manera:

*¿Para usted cómo debería ser el proceso estratégico para la toma de decisiones sobre priorización de obras de infraestructura de transporte masivo en una ciudad? Expresado*

*de otra forma, ¿Cómo definir si la siguiente línea de metro o BRT debería ir por uno u otro corredor, en una ciudad típica de Latinoamérica?*

Las respuestas dadas por los expertos se listan a continuación, ordenadas según el número de veces que cada una fue citada, empezando por las más comentadas:

- Existe consenso entre los expertos acerca de que se requiere una planeación integral y de largo plazo para poder tomar decisiones estratégicas sobre la priorización de corredores de transporte masivo en Bogotá. Para ello, se propone la recuperación del plan de expansión existente o la elaboración de un nuevo plan marco para el SITP que permita establecer un cronograma de priorización futura de diferentes corredores férreos y troncales, basándose en modelos y datos cuantitativos que pongan en cifras precisas el impacto de las diferentes alternativas. Este impacto puede cuantificarse tomando en cuenta los pasajeros proyectados para cada corredor, el costo de las respectivas obras y el valor presente estimado de los beneficios que podría traer cada proyecto de infraestructura de transporte. Todo lo anterior sin perder de vista aspectos políticos y financieros que sin duda pueden afectar la priorización de las obras.
- En cuanto a corredores viales específicos, sin contar el corredor de la Cr. 68, el más mencionado fue la troncal BRT de la Av. Boyacá, en toda su extensión de sur a norte a lo largo de la ciudad.
- En segundo lugar, algún sistema de transporte, no necesariamente BRT, por la Cr. 7 o cualquier otra avenida del borde nororiental.
- Lo siguiente más citado fue la ampliación de la futura Primera Línea del Metro de Bogotá, bien sea por la Autopista Norte, Suba o Engativá.
- A continuación, aparecen las troncales de la Av. Cali y la Av. Villavicencio, esta última para conectar la troncal Av. Caracas Sur con el portal Américas.

Otras valiosas respuestas dadas a esta pregunta incluyen:

- Una troncal en la Cl. 170 que interconecte las troncales existentes y futuras que vayan de sur a norte por las principales avenidas (carreras) de la ciudad.
- Una línea de metro por la Av. NQS, aprovechando que esta avenida fue concebida como un corredor rápido de tráfico general. Además, dado que la NQS ya ejerce un efecto barrera, una línea de metro por este corredor no generaría una barrera urbana adicional.
- El corredor férreo del sur para conectar con Soacha.
- Extensión de la troncal Av. Caracas hasta Yomasa, en el sur.
- Extensión de la troncal Autopista Norte más allá del Terminal del Norte.
- Extensión de la troncal Cl. 80 hasta el Puente de Guadua.

## C.4 Sobre principios rectores para diseño de rutas

*4.) ¿Cuáles son para usted los principios rectores que deberían regir el diseño de rutas en el componente troncal del SITP? (Entendiendo que el proceso de diseño aplica a trazados geográficos, selección de estaciones de parada, intervalos de paso, tipologías de las unidades transportadoras)*

La pregunta fue formulada tal cual a los expertos internacionales de las entrevistas 9 y 11.

Los principios rectores más relevantes mencionados por los expertos se listan a continuación, ordenados según el número de veces que cada uno fue planteado, empezando por los más comentados y aclarando que las entrevistas pueden haber proporcionado algunos principios contradictorios entre sí, lo que es entendible teniendo en cuenta la diversidad de enfoques de los diferentes expertos consultados:

- Sin duda alguna, el principal principio rector planteado por los expertos es garantizar la calidad del servicio al usuario. Esto incluye, más no se limita a, tener

un nivel de servicio objetivo, ofrecer frecuencias dentro de rangos mínimos aceptables y centrar la conceptualización del sistema en el usuario. Además, es necesario buscar alternativas de financiación que no constriñan las posibilidades de implementar un sistema de transporte de calidad.

- El segundo principio rector, de acuerdo al número de veces en que fue comentado, consiste en disminuir los principales costos generalizados, tales como los tiempos de viaje, de acceso y de espera. Además, debe existir un mecanismo claro, transparente y visible que permita demostrar que cada rediseño de servicios impacta positivamente en los tiempos generalizados del usuario y que no se van a superar ciertos valores máximos en las variables operacionales más relevantes, tales como los tiempos de espera.
- El tercer principio rector, ubicado muy cerca del segundo, es garantizar la asequibilidad del sistema de transporte, tanto financiera como socialmente. Los usuarios deben estar en capacidad de pagar la tarifa establecida por el servicio, por lo cual es fundamental que el sistema encuentre fuentes alternativas de financiación y que no dependa solamente de los recursos de la taquilla. Particularmente, el sistema debe ser accesible para aquellos que más lo necesitan.
- El cuarto principio en esta lista es el relativo al cuidado del medio ambiente. El sistema debe diseñarse de tal forma que minimice su impacto ambiental.
- Al mismo nivel que el principio anterior, se encuentra la comunicación estratégica con los usuarios. Por un lado, es necesario que los planificadores del sistema entiendan como los usuarios toman sus decisiones de viaje y comprendan las necesidades reales de estos. Por el otro lado, la información entregada al usuario es vital, especialmente la información en tiempo real sobre el estado del sistema, las frecuencias de los buses y los tiempos de espera. Es fundamental hacer uso de las tecnologías de la información para mejorar esta comunicación de doble vía con los usuarios.

Los siguientes principios fueron mencionados con la misma frecuencia por parte de los expertos:

- Planificar con base en datos recolectados en campo y mediciones continuas del estado de las cosas. Se requiere medir y conocer lo que se está tratando de mejorar.
- Disminuir los siniestros viales.
- Aumentar la cobertura, la accesibilidad y la capacidad para ofrecer el servicio a un mayor número de personas a un costo razonable.

También fueron obtenidos principios relativos al diseño de detalle de la red de rutas:

- Deben existir distintas rutas diseñadas con distintos criterios, el sistema debe estar compuesto por distintas alternativas. Por ejemplo, es necesario incluir rutas expresas y semiexpresas en el diseño, y toda estación debe tener por lo menos una ruta de este tipo. Así mismo, el número de rutas expresas por estación debe ser proporcional a la demanda en cada estación. Adicionalmente, es conveniente diseñar rutas que atiendan zonas (tramos continuos y delimitados) de origen y/o destino para distribuir mejor la demanda entre varios puntos, sin sobrecargar una única estación en una zona.
- Simplicidad en el diseño de la red de rutas.
- La ruta paradora de un corredor debe tener menos demanda que la correspondiente ruta expresa. Si entre dos puntos existe una ruta expresa con menos demanda que la ruta paradora, es porque la ruta expresa requiere más paradas en ese tramo.
- Equilibrar la oferta de buses en las diferentes direcciones.
- Las frecuencias de cada ruta deben tener unos límites mínimos y máximos. El límite mínimo garantiza la calidad del servicio. El límite máximo evita tener

intervalos de paso muy cortos para que los buses no terminen formando convoyes si hay muy poco tiempo entre ellos.

- Implementar rutas diametrales, sobre todo si existen rutas que se crucen en el centro de la ciudad.
- No iterar indefinidamente buscando alcanzar el equilibrio en un modelo de transporte con una red de rutas compleja, tal como la troncal de TransMilenio. Es altamente probable que la solución sea inestable y nunca se pueda cerrar.
- La flota de mayor capacidad debe ir asignada a las rutas con mayor demanda y se debe disponer de los buses más grandes posibles.
- Diseñar rutas sin pendiente para sistemas BRT.
- Implementar corredores troncales a lo largo de zonas con una densidad de población lo suficientemente alta.

Otros valiosos principios aportados incluyen:

- Integralidad con otros modos de transporte, incluyendo el transporte público individual, los modos informales y complementarios, y la micromovilidad en general.
- Equidad en el trato a los concesionarios operadores, en relación con la oferta.

Y finalmente, pero no por ello menos importante, un principio sobre la formulación de principios:

- Es necesario definir de lo que se está hablando y definir todo con indicadores cuantificables. Cualquier principio debe ser explícito y exacto.

## C.5 Sobre cambios en pro de la mejora del servicio

5.) *¿Qué cambios o acciones concretas recomendaría usted sobre la actual red de rutas del componente troncal del SITP en pro de la mejora del servicio al usuario?*

En el caso de los expertos internacionales de las entrevistas 9 y 11, la pregunta se ha formulado de la siguiente manera:

*Desde el punto de vista de la planeación de transporte, ¿Qué cambios o acciones concretas recomendaría usted sobre las redes actuales de rutas en sistemas BRT de Latinoamérica en pro de la mejora del servicio al usuario?*

Las principales acciones aconsejadas por los expertos se listan a continuación, ordenadas según el número de veces que cada una fue planteada, empezando por las más comentadas y aclarando que las entrevistas pueden haber proporcionado algunas propuestas contradictorias entre sí, lo que es entendible teniendo en cuenta la variedad de enfoques de los diferentes expertos consultados:

- Sin duda alguna, la acción más sugerida es que se requiere un rediseño operacional del sistema troncal. Este rediseño podría implicar:
  - Mantener una función objetivo que minimice el tiempo generalizado de viaje para las personas.
  - Cambiar significativamente los servicios teniendo en cuenta la capacidad de las estaciones y minimizando el tiempo que pierden los buses haciendo filas para detenerse en una misma parada.
  - Diseñar de tal modo que no se tengan más de dos servicios en una misma parada.
  - Simplificar la red de rutas, reduciendo sus longitudes para facilitar el control operativo y optimizar el uso de la flota, aunque esto podría aumentar los transbordos en el sistema.
  - Evaluar la longitud de los viajes de los usuarios para determinar si las rutas deben ser radiales o diametrales.
  - Segmentar la operación troncal según los perfiles de la demanda y los viajes a lo largo de la ciudad.

- Evaluar la posibilidad de un rediseño de servicios con menos conexiones entre troncales, aunque posiblemente con más transbordos.
  - Evaluar la posibilidad de operar rutas pretroncales con buses articulados.
  - Implementar servicios parciales, por segmentos de la troncal, que no empiecen en los portales.
  - Implementar servicios asimétricos.
  - No personalizar demasiado la oferta de servicios según el día, la hora y la ubicación.
  - Diseñar una red modular de servicios: tener una red de servicios básicos que operen siempre, y sobre esta red base añadir servicios suplementarios en ciertos horarios.
  - Crear un módulo de servicios nocturnos para satisfacer la demanda en esa franja horaria.
  - Estandarizar la nomenclatura de las rutas.
- La segunda acción más comentada es que se debe planificar con base en la observación y la experiencia. Este concepto podría incluir recomendaciones, tales como:
    - No descartar la experiencia frente a los modelos. Los modelos solo son un mecanismo, una herramienta indicativa.
    - Diseñar iterativamente y revisar el estado del sistema periódicamente.
    - Realizar intervenciones estratégicas mediante un monitoreo muy específico y detallado con el que sea posible generar intervenciones pequeñas, pero de alto impacto.
    - Observar los niveles de ocupación a lo largo del día y medir niveles de saturación en las estaciones.
    - Utilizar datos provenientes de herramientas tecnológicas y de la telemetría de los buses para mejorar el control de la operación y la programación de los servicios.
    - Revisar como se diseñan las rutas en otras ciudades.
- La tercera acción según el número veces que fue mencionada consiste en mejorar la interacción con los usuarios y los sistemas de información, lo que podría abarcar:

- Mejorar en el corto plazo los sistemas de información al usuario, con énfasis en la información del sistema en tiempo real y haciendo uso de las herramientas tecnológicas desplegadas o por desplegar.
- Entender como los usuarios toman sus decisiones de viaje. Las personas no necesariamente toman decisiones racionales.
- Consultar a los usuarios sobre lo que necesitan, para así poder tomar mejores decisiones de diseño sobre el sistema.
- Implementar servicios por demanda usando herramientas tecnológicas.

Las siguientes acciones fueron mencionadas con la misma frecuencia por parte de los expertos:

- Mejorar el control de la operación. Para ello, una posible alternativa es reducir el número de servicios.
- Generar equilibrio y holgura entre la oferta y la demanda. Esto implica revisar los intervalos de paso de los servicios y los posibles desequilibrios en la oferta de estos. Además, se requiere repensar el balance entre oferta y demanda, estableciendo unos márgenes de holgura entre las dos variables.

Otras valiosas respuestas dadas a esta pregunta incluyen:

- Ampliación de capacidad y rediseño de las estaciones para acondicionarse a la nueva flota de buses biarticulados.
- Integración con otros modos de transporte, particularmente los enmarcados dentro de la micromovilidad.
- Promoción y mejora de la cultura ciudadana. Se debe caracterizar al usuario y estimularlo para que adopte comportamientos adecuados y se apropie del sistema de transporte. Igualmente, es necesario enfrentar el tema de la inseguridad: ventas ambulantes, falta de respeto a la autoridad e incumplimiento de las normas de comportamiento.

## Bibliografía

- [1] TransMilenio S.A., «Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público -SITP 2019,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/149180/estadisticas-de-oferta-y-demanda-del-sistema-integrado-de-transporte-publico-sitp/>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [2] TransMilenio S.A., «Mapa Interactivo de TransMilenio,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150402/publicacionesmapa\\_interactivo\\_de\\_transmilenio/](https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/150402/publicacionesmapa_interactivo_de_transmilenio/). [Último acceso: 25 07 2020].
- [3] TransMilenio S.A., «GTFS Estáticos 2020-02-20,» 2020. [En línea]. Available: <https://datosabiertos-transmilenio.hub.arcgis.com/datasets/gtfs-est%C3%A1ticos-2020-02-20>. [Último acceso: 17 04 2020].
- [4] H. Scorcia, Design and evaluation of BRT and limited-stop services, Boston: MIT, 2010.
- [5] A. Ceder, Public Transit Planning and Operation, Oxford: Elsevier, 2007.
- [6] K. Kepaptsoglou y M. Karlaftis, «Transit Route Network Design Problem: Review,» *Journal Of Transportation Engineering*, vol. 135, nº 8, pp. 491-505, 2009.
- [7] W. Fan y R. Machemehl, Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results, Austin: Center for Transportation Research, Univ. of Texas, 2004.
- [8] Y. Lee y V. Vuchic, «Transit network design with variable demand,» *Journal Of Transportation Engineering*, vol. 131, nº 1, pp. 1-10, 2005.
- [9] F. Zhao y X. Zeng, «Optimization of transit network layout and headway with a combined genetic algorithm and simulated annealing method,» *Engineering Optimization*, vol. 38, nº 6, p. 701–722, 2006.
- [10] A. Ceder y Y. Israeli, «User and operator perspectives in transit network design,»

- Transportation Research Record.*, vol. 1623, p. 3–7, 1997.
- [11] E. Morlok y P. Viton, «Feasibility of profitable transit service in radial urban corridors,» *Transportation Research Record*, vol. 980, pp. 46-54, 1984.
- [12] W. Fan y R. Machemehl, «Optimal transit route network design problem with variable transit demand: A genetic algorithm approach,» *Journal Of Transportation Engineering*, vol. 132, nº 1, p. 40–51, 2006.
- [13] F. Zhao y X. Zeng, «Optimization of user and operator cost for large scale transit networks,» *Journal Of Transportation Engineering*, vol. 133, nº 1, p. 240–251, 2007.
- [14] R. Van Nes, R. Hamerslag y B. Immers, «Design of public transport networks,» *Transportation Research Record*, vol. 1202, p. 74–83, 1988.
- [15] P. Delle Site y F. Filippi, «Bus service optimization with fuel saving objective and various financial constraints,» *Transportation Research Record*, vol. 35, nº 2, p. 163–182, 2001.
- [16] S. Chang y P. Schonfeld, «Optimal dimensions of bus service zones,» *Journal Of Transportation Engineering*, vol. 119, nº 4, p. 567–585, 1993.
- [17] R. Van Nes, «Multi user-class urban transit network design,» *Transportation Research Record*, vol. 1835, p. 25–33, 2003.
- [18] E. Cipriani, G. Fusco, S. Gori y M. Petrelli, «A procedure for the solution of the urban bus network design problem with elastic demand,» de *Proc. 10th Meeting of the EURO Working Group on Transportation*, Poznan, Poland, 2005.
- [19] V. Tom y S. Mohan, «Transit route network design using frequency coded genetic algorithm,» *Journal Of Transportation Engineering*, vol. 129, nº 2, pp. 186-195, 2003.
- [20] P.Chakroborty y T. Dwivedi, «Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms,» *Engineering Optimization*, vol. 34, nº 1, pp. 83-100, 2002.
- [21] S. Carrese y S. Gori, «An urban bus network design procedure,» de *Transportation planning*, The Netherlands, Kluwer Academic, 2002, p. 177–195.
- [22] J. Hu, X. Shi, J. Song y Y. Xu, «Optimal design for urban mass transit network based on evolutionary algorithm,» de *Lecture notes in computer science 3611*, vol. 3611, Berlin-Heidelberg, Springer, 2005.

- [23] B. Yu y Z. Yang, «Model and algorithm for iterative design of bus network,» de *Proc., 9th Int. Conf. on the Applications of Advanced Technologies in Transportation*, Chicago, 2006.
- [24] Z. Yang, B. Yu y C. Cheng, «A parallel ant colony algorithm for bus network optimization,» *Computer Aided Civil and Environmental Engineering*, vol. 22, nº 1, p. 44–55, 2007.
- [25] C. Mandl, «Evaluation and optimization of urban public transportation networks,» *European Journal of Operational Research*, vol. 5, nº 6, p. 396–404, 1980.
- [26] I. Norambuena, *Diseño óptimo de sistemas de transporte público urbano*, Santiago: Universidad Católica de Chile, 2002.
- [27] C. Leiva, J. Muñoz, R. Giesen y H. Larrain, «Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints,» *Transportation Research*, vol. B, nº 44, pp. 1186-1201, 2010.
- [28] H. Larrain, R. Giesen y J. Muñoz, «Choosing the right express services for bus corridor with capacity restrictions,» *Transportation Research Record*, vol. 2197, pp. 63-70, 2010.
- [29] H. Larrain y J. C. Muñoz, «The danger zone of express services: when increasing frequencies can deteriorate the level of service,» *Transportation Research Procedia* 38, 341–358, vol. 38, pp. 341-358, 2019.
- [30] D. Arana, *Herramienta para el diseño óptimo de la red de rutas en sistemas de transporte masivo con aplicacion a TransMilenio SA*, Bogotá: Universidad de los Andes, 2004.
- [31] N. Hart, «Methodology for Evaluating Potential for Limited-Stop Bus Service Along Existing Local Bus Corridors,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº 2543, pp. 91-100, 2016.
- [32] G. Ghaderi, M. Brussel, F. v. d. Bosch y A. B. Grigolon, «Reducing travel time in Bus Rapid Transit through limited stop services, a GIS based approach,» de *Proceedings of the 15th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management*, Adelaide, Australia, 2017.
- [33] X. Luo, Y. Jiang, Z. Yao, Youhua Tang y Y. Liu, «Designing Limited-Stop Transit Service with Fixed Fleet Size in Peak Hours by Exploiting Transit Data,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, nº

- 2647, pp. 134-141, 2017.
- [34] A. F. García y D. Jaramillo, «Limited-Stop High-Frequency Service Design: Reducing In-Vehicle Congestion,» *Journal of Advanced Transportation: Article ID 5745870*, vol. 2019, p. 9 pages, 2019.
- [35] M. R. Campos, *Strategies for Modelling BRT Massive Transportation Systems- TransMilenio Case*, Bogotá: Universidad de los Andes, 2016.
- [36] F. Peña, A. Jiménez y A. Mateos, «Optimising TransMilenio BRT system operation: a mathematical model,» *International Journal of Operational Research*, vol. 25, nº 4, pp. 416-436, 2016.
- [37] F. Martínez, M. Gulnara y A. Mauttone, «Model and solution method to a simultaneous route design and frequency setting problem for a bus rapid transit system in Colombia,» *Pesquisa Operacional, Vol. 37(2)*, vol. 37, nº 2, pp. 403-434, 2017.
- [38] G. B. Soto, *Un Algoritmo Bi-Nivel De Diseño De Servicios Limited-Stop Con Asignación Determinística Y Estocástica*, Santiago: Pontificia Universidad Católica De Chile, 2017.
- [39] J. D. Páez, *Planeación dinámica e inteligente de rutas para sistemas de transporte BRT*, Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, 2017.
- [40] DNP, «Conpes 3945: Apoyo del Gobierno nacional al sistema de transporte público de Bogotá y declaración de importancia estratégica del proyecto “Construcción del tramo 1 de la Primera Línea de Metro de Bogotá...»,» Bogotá, 2018.
- [41] DNP, «Conpes 3899: Apoyo del Gobierno nacional a la política de movilidad de la Región Capital Bogotá-Cundinamarca y declaratoria de importancia estratégica del proyecto Sistema Integrado de Transporte Masivo – Soacha fases II y III,» Bogotá, 2017.
- [42] DNP, «Conpes 3900: Apoyo del Gobierno nacional al sistema de transporte Público de Bogotá y declaratoria de importancia estratégica del proyecto Primera Línea de Metro-Tramo 1,» Bogotá, 2017.
- [43] DNP, «Conpes 3902: Declaración de importancia estratégica del proyecto Regiotram de Occidente,» Bogotá, 2017.
- [44] TransMilenio S.A., «Parámetros Técnicos Operacionales de la Troncal Avenida Ciudad de Cali desde la Calle 170 hasta el Límite de Soacha, para el Sistema

- TransMilenio v5,» Bogotá, 2017.
- [45] TransMilenio S.A., «Parámetros Técnicos Operacionales de la Troncal Avenida Boyacá entre Yomasa y la Calle 183, para el Sistema TransMilenio v3,» Bogotá, 2017.
- [46] TransMilenio S.A., «Parámetros Técnicos Operacionales de la Troncal Avenida 68 entre la Carrera 7 y la Autopista Sur (Av. NQS), para el Sistema TransMilenio v4.,» Bogotá, 2017.
- [47] TransMilenio S.A., «Parametros técnicos operacionales de la interaccion de la Primera Linea de Metro con el sistema TransMilenio,» Bogotá, 2016.
- [48] S. D. d. Movilidad, «Resumen ejecutivo supuestos y resultados de modelación,» Bogotá, 2017.
- [49] Secretaría Distrital de Movilidad, «Informe ejecutivo de modelación de la demanda,» Bogotá, 2017.
- [50] Secretaría Distrital de Movilidad, «Informe de integración de proyectos de transporte masivo,» Bogotá, 2017.
- [51] TransMilenio S.A., «Anexo Técnico - Plan Marco del SITP,» Bogotá, 2019.
- [52] Secretaría Distrital de Movilidad, «Resultados de la Encuesta de Movilidad de Bogotá y municipios vecinos,» Bogotá, 2019.
- [53] DANE, «Proyecciones de población,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [54] Censo 2017, «Estimaciones y Proyecciones de la Población de Chile 1992-2050 (Total País),» 2017. [En línea]. Available: <http://www.censo2017.cl/>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [55] INEI, «Perú: Crecimiento y distribución de la población, 2017,» Lima, 2018.
- [56] Alcaldía de Bogotá, «Todo lo que debes saber sobre Bogotá en 2019,» 2019. [En línea]. Available: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/turismo/informacion-de-bogota-en-2019>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [57] INE; MINVU, «Metodología para medir el Crecimiento Urbano de las Ciudades de Chile,» 2017. [En línea]. Available: <http://ine->

- chile.maps.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=cf0be9a196e24eaa9e6eafb970939f2a. [Último acceso: 16 02 2020].
- [58] BCN, «Región Metropolitana de Santiago: Chile Nuestro País,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/nuestropais/region13/>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [59] Red Metropolitana de Movilidad, «Información del sistema,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.red.cl/acerca-de-red/informacion-del-sistema>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [60] Línea 1 Metro de Lima, «Comunicado 22,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.lineauno.pe/noticias/comunicado-22/>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [61] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Conócenos: Sistema,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/sistema/>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [62] Metro de Santiago, «Plano de Red,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.metro.cl/tu-viaje/plano-de-red>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [63] Metro de Lima y Callao, «Rutas,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.metrodelima.gob.pe/rutas.php>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [64] DTP Metropolitano, «Infraestructura Vial,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/infraestructura/infraestructura-vial>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [65] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Conócenos: Rutas Troncal,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/rutas/troncal-2-2/>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [66] Recaudo Bogotá S.A., «Tullave: Tarifas,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.tullaveplus.com/web/public/tarifas>. [Último acceso: 18 02 2020].
- [67] Red Metropolitana de Movilidad, «Conoce las Tarifas,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.red.cl/tarifas-y-pagos/conoce-las-tarifas>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [68] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Tarifas,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.metropolitano.com.pe/tarifas-y-puntos-de-recarga/tarifas/>. [Último acceso: 16 02 2020].

- [69] Zygomatic, «nubedepalabras.es,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.nubedepalabras.es/>. [Último acceso: 14 05 2020].
- [70] Caliper, «TransCad,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.caliper.com/transcad/introduccion.htm>. [Último acceso: 12 05 2020].
- [71] INRO, «Emme,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.inrosoftware.com/en/products/emme/>. [Último acceso: 12 05 2020].
- [72] PTV Group, «PTV Visum,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ptvgroup.com/es/soluciones/productos/ptv-visum/>. [Último acceso: 24 06 2020].
- [73] ITDP, «BRT Standard,» New York, 2016.
- [74] MIO, «Rutas MIO CALI,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.mio.com.co/index.php/rutas.html>. [Último acceso: 27 06 2020].
- [75] Metroplús, «Metroplús Sitio Oficial,» 2020. [En línea]. Available: <https://metroplus.gov.co/>. [Último acceso: 27 06 2020].
- [76] Sistema de Tren Eléctrico Urbano, «SITEUR Guadalajara: Macrobus,» 2020. [En línea]. Available: <http://siteur.gob.mx/macrobust/linea-1.html>. [Último acceso: 27 06 2020].
- [77] Transmetro, «Rutas Troncales,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.transmetro.gov.co/rutas-troncales>. [Último acceso: 27 06 2020].
- [78] PTV, «8.9 Headway-based assignment,» de *PTV Visum 2021 Manual*, Karlsruhe, Germany, PTV AG, 2020, pp. 542-566.
- [79] J. Ortuza y L. Willumsen, «5.1 Definition and Notations,» de *Modelling Transport*, Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2001, pp. 176-179.
- [80] Transmilenio S.A., «Trazados Troncales de TRANSMILENIO,» 2019. [En línea]. Available: <https://datosabiertos-transmilenio.hub.arcgis.com/datasets/trazados-troncales-de-transmilenio?geometry=-74.557%2C4.489%2C-73.690%2C4.728>. [Último acceso: 17 04 2020].
- [81] TransMilenio S.A., «Estaciones Troncales de TRANSMILENIO,» 2019. [En línea]. Available: <https://datosabiertos-transmilenio.hub.arcgis.com/datasets/estaciones-troncales-de-transmilenio>. [Último acceso: 17 04 2020].

- [82] TransMilenio S.A., «Validaciones Tarjeta Tullave,» 2020. [En línea]. Available: <https://datosabiertos-transmilenio.hub.arcgis.com/>. [Último acceso: 25 05 2020].
- [83] Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ingeniería, «Línea base de evasión al pago de la tarifa en el componente troncal del Sistema de Transporte Masivo de Bogotá, TransMilenio,» 2019, 2019.
- [84] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., «Portal SIMUR - Encuestas de Movilidad,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.simur.gov.co/portal-simur/datos-del-sector/encuestas-de-movilidad/>. [Último acceso: 16 03 2020].
- [85] TransMilenio S.A., «Buscador de rutas,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.transmilenio.gov.co/buscador\\_de\\_rutas](https://www.transmilenio.gov.co/buscador_de_rutas). [Último acceso: 20 02 2020].
- [86] PTV, «8.9.4 Choice models for boarding decisions,» de *PTV Visum 2021 Manual*, Karlsruhe, Germany, PTV AG, 2020, pp. 549-554.
- [87] TransMilenio S.A., «Nueva flota de TransMilenio es en su mayoría a gas,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/151058/nueva-flota-de-transmilenio-es-en-su-mayoria-a-gas/#:~:text=La%20nueva%20flota%20de%>. [Último acceso: 15 09 2020].
- [88] Empresa de Renovación y Desarrollo Urbano de Bogotá, «Estación Central,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.eru.gov.co:81/en/node/171>. [Último acceso: 16 11 2020].
- [89] TransMilenio S.A., «Planea el viaje de TransMilenio con TransMiApp,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.sitp.gov.co/publicaciones/40610/planea\\_un\\_viaje\\_en\\_transmilenio\\_con\\_transmiapp/](https://www.sitp.gov.co/publicaciones/40610/planea_un_viaje_en_transmilenio_con_transmiapp/). [Último acceso: 21 11 2020].
- [90] Banco Central de Chile, «PIB Regional,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.bcentral.cl/areas/estadisticas/pib-regional>. [Último acceso: 18 02 2020].
- [91] Gobierno Regional Metropolitano de Santiago, «Datos Geográficos,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.gobiernosantiago.cl/datos-geograficos/>. [Último acceso: 18 02 2020].
- [92] Municipalidad de Santiago, «Santiago y sus alcaldes,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.munistgo.cl/santiago-y-sus-alcaldes-2/>. [Último acceso: 18 02 2020].
- [93] Gobierno Regional Metropolitano de Santiago, «Estructura Orgánica Funcional,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.gobiernosantiago.cl/organigrama-GORERM/>. [Último acceso: 18 02 2020].

- [94] DTP Metropolitano, «Directorio de Transporte Público Metropolitano,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/homepage/directorio-de-transporte-publico>. [Último acceso: 18 02 2020].
- [95] Presidencia de la República de Chile, «Instructivo Presidencial No. 002,» Santiago, 2013.
- [96] Municipalidad de Santiago, «Situación geográfica,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.munistgo.cl/situacion-geografica/>. [Último acceso: 18 02 2020].
- [97] DTP Metropolitano, «Programas de Operación,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/noticias/pov2>. [Último acceso: 20 02 2020].
- [98] Red Metropolitana de Movilidad, «Detalle de empresas,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.red.cl/acerca-de-red/detalle-de-empresas>. [Último acceso: 20 02 2020].
- [99] Red Metropolitana de Movilidad, «Mapa general del Sistema,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.red.cl/mapas-y-recorridos/mapas-de-recorridos>. [Último acceso: 20 02 2020].
- [100] Cooperativa.cl, «Metro enfrentará aglomeraciones repotenciando buses clones,» 20 03 2007. [En línea]. Available: <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/transportes/transantiago/metro-enfrentara-aglomeraciones-repotenciando-buses-clones/2007-03-20/204002.html>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [101] Red Metropolitana de Movilidad, «Directorio de Transporte Público reforzará servicio de estaciones de Metro inoperativas con buses clones,» 22 07 2016. [En línea]. Available: <http://www.red.cl/noticias/directorio-de-transporte-publico-reforzara-servicio-de-estaciones-de-metro-inoperativas-con-buses-clones>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [102] Red Metropolitana de Movilidad, «Plan especial de buses para este martes 22 de octubre,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.red.cl/noticias/informate-aqui-del-plan-especial-de-buses-para-este-martes-22-de-octubre>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [103] DTP Metropolitano, «Plan Maestro Infraestructura,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/infraestructura/plan-maestro-infraestructura>. [Último acceso: 22 02 2020].

- [104] DTP Metropolitano, «Refugios y Puntos de Parada,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/infraestructura/refugios-y-puntos-de-parada>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [105] DTP Metropolitano, «Zonas Pagas,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/infraestructura/zonas-pagas>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [106] DTP Metropolitano, «Estaciones de Traslado,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/infraestructura/estaciones-de-traslado>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [107] DTP Metropolitano, «Infraestructura Metro,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/infraestructura/infraestructura-metro>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [108] DTP Metropolitano, «Estaciones de Intercambio Modal,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.dtpm.gob.cl/index.php/infraestructura/estaciones-de-intercambio-modal>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [109] Sociedad Concesionaria Intermodal La Cisterna S.A., «Transporte,» 2018. [En línea]. Available: <https://intermodales.cl/transporte/>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [110] Sociedad Concesionaria Intermodal La Cisterna S.A., «Nuestra Empresa,» 2018. [En línea]. Available: <https://intermodales.cl/nuestra-empresa/>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [111] Sociedad Concesionaria Intermodal La Cisterna S.A., «Servicios y Comercio,» 2019. [En línea]. Available: <https://intermodales.cl/locales/>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [112] Fiscalización Transportes, «Listado de vías exclusivas y pistas sólo buses de la Región Metropolitana,» 2020. [En línea]. Available: <http://www.fiscalizacion.cl/listado-de-vias-exclusivas-y-pistas-solo-buses-de-la-region-metropolitana/>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [113] INEI, «Producto bruto interno por departamentos,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/producto-bruto-interno-por-departamentos-9089/>. [Último acceso: 19 03 2020].
- [114] Municipalidad de Lima, «Lima,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.munlima.gob.pe/lima>. [Último acceso: 19 03 2020].

- [115] Congreso de la Republica del Perú, «Ley 27972: Ley Orgánica de Municipalidades,» Lima, 2003.
- [116] Gobierno Regional del Callao, «Misión y Visión,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.regioncallao.gob.pe/Menu?opcion=misiVisiObje>. [Último acceso: 20 03 2020].
- [117] Congreso de la Republica del Perú, «Ley 39000: Ley que crea la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao,» Lima, 2018.
- [118] J.-C. Driant, Las barriadas de Lima 1940-1980: historia e interpretación, Lima: Institut français d'études andines, 1991.
- [119] L. Boudet, «La integración tarifaria y el sistema único de recaudo como pilar fundamental para el desarrollo de un sistema de transporte público integrado,» Lucile Boudet, CODATU, 2017.
- [120] Línea 1 Metro de Lima, «Tarifas,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.lineauno.pe/tarifas/>. [Último acceso: 22 03 2020].
- [121] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Tarjetas: Tipos,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/tarjetas/tipos/>. [Último acceso: 22 03 2020].
- [122] Línea 1 Metro de Lima, «Estaciones,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.lineauno.pe/estaciones/>. [Último acceso: 22 03 2020].
- [123] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Corredores Complementarios,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.protransporte.gob.pe/corredor-complementario/>. [Último acceso: 26 03 2020].
- [124] Wikipedia, «Corredores Complementarios Rutas,» 2019. [En línea]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corredores\\_Complementarios\\_Rutas.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Corredores_Complementarios_Rutas.svg). [Último acceso: 26 03 2020].
- [125] Wikipedia, «Usuario:Alexis Eco,» 2018. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Alexis\\_Eco](https://es.wikipedia.org/wiki/Usuario:Alexis_Eco). [Último acceso: 26 03 2020].
- [126] Creative Commons, «Licencia Atribución/Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional,» 2019. [En línea]. Available: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.es>. [Último acceso: 26 03 2020].

2020].

- [127] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Conócenos: Rutas Alimentadora,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/rutas/ruta-alimentadora/>. [Último acceso: 24 03 2020].
- [128] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Conócenos: Infraestructura Terminales,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/infraestructura/terminales/>. [Último acceso: 29 03 2020].
- [129] Instituto Metropolitano PROTRANSPORTE de Lima, «Conócenos: Infraestructura Estaciones,» 2019. [En línea]. Available: <http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/infraestructura/estaciones/>. [Último acceso: 29 03 2020].