

**ANÁLISIS DE MÉTODOS Y EFICIENCIA DE LA OPERACIÓN Y GESTIÓN DE  
TRANSPORTE PÚBLICO CON INFRAESTRUCTURA FIJA  
CASO – METRO DE SAO PAULO**

**MARCELA FERNANDA ORTEGA ERAZO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
ALTERNATIVA VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL  
BOGOTÁ  
2016**

**ANÁLISIS DE MÉTODOS Y EFICIENCIA DE LA OPERACIÓN Y GESTIÓN DE  
TRANSPORTE PÚBLICO CON INFRAESTRUCTURA FIJA  
CASO – METRO DE SAO PAULO**

**MARCELA FERNANDA ORTEGA ERAZO**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de  
Ingeniera Industrial**

**Asesor  
Hernando Castro Piñeros  
Ingeniero Industrial**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
ALTERNATIVA VISITA TÉCNICA INTERNACIONAL  
BOGOTÁ  
2016**



## Atribución-Compartir Igual 2.5 Colombia (CC BY-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-Compartir Igual 2.5 Colombia (CC BY-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/co/>

### Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 23, noviembre, 2016

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. GENERALIDADES	11
1.1 ANTECEDENTES	11
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2.1 Descripción del problema	11
1.2.2 Formulación del problema	11
1.3 OBJETIVOS	12
1.3.1 Objetivo general	12
1.3.2 Objetivos específicos.	12
1.4 JUSTIFICACIÓN	12
1.5 DELIMITACIÓN	13
1.5.1 Espacio	13
1.5.2 Tiempo	13
1.5.3 Contenido	13
1.5.4 Alcance	13
1.6 MARCO REFERENCIAL	13
1.6.1 Marco teórico	13
1.6.1.1 Transporte	13
1.6.1.2 Movilidad	14
1.6.1.3 Crecimiento económico	14
1.6.1.4 Crecimiento demográfico	14
1.6.2 Marco conceptual.	14
1.6.2.1 Transporte público	14
1.6.2.2 Sistema de transporte público	15
1.6.2.3 Eficiencia	16
1.7 METODOLOGÍA	16
1.7.1 Tipo de estudio	16
1.7.2 Fuentes de información	16
1.7.2.1 Fuentes primarias	16
1.7.2.2 Fuentes secundarias	17
1.8 DISEÑO METODOLÓGICO	17
2. IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA	18
2.1 LA EMPRESA COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SAO PAULO METRO	18
2.1.1 Identificación de la empresa	18
2.1.2 Empresas asociadas	18
2.2 MISIÓN Y VISIÓN	19
2.1.1 Misión	19
2.1.2 Visión	19

	pág.
2.3 IMAGEN CORPORATIVA	20
2.4 ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA	20
2.4.1 Junta directiva	20
2.4.2 Consejo administrativo	21
2.4.3 Consejo fiscal	21
2.5 LEGISLACIÓN SOBRE TRANSPORTE DE PASAJEROS	22
2.6 CÓDIGO DE ÉTICA Y CONDUCTA	22
2.6.1 Ética	22
2.6.1.1 Código de ética y conducta	22
2.6.1.2 Ética y conducta	22
2.6.2 Valores	22
2.6.3 Conducta	23
2.7 POLÍTICA INTEGRADA	24
2.8 CERTIFICACIONES	24
2.9 EL SISTEMA METRO Y SU EVOLUCIÓN	25
3. SISTEMA DE TRANSPORTE METRO EN SAO PAULO (BRASIL)	27
3.1 MOVILIDAD EN SAO PAULO	27
3.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA METRO DE SAO PAULO	28
3.3 TARIFAS DEL METRO DE SAO PAULO	29
3.4 DEMANDA	30
3.5 ESTRUCTURA FÍSICA	30
3.6 CARACTERIZACIÓN DEL USUARIO	30
3.7 INDICADORES	31
3.8 OPERACIÓN DEL SISTEMA	32
3.9 METODOLOGÍA	33
3.10 MANTENIMIENTO	34
3.11 CONSTRUCCIÓN	35
3.11.1 El metro de superficie	36
3.11.2 El metro elevado	37
3.11.3 Metro subterráneo	38
3.11.3.1 Zanjas o VCA	39
3.11.3.2 Túneles Mineros NATM	39
4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA METRO EN BOGOTÁ (COLOMBIA)	43
4.1 LA EMPRESA METRO DE BOGOTÁ	43
4.1.1 Descripción de la empresa	43
4.2 CONDICIONES GEOTÉCNICAS EN BOGOTÁ	44
4.2.1 Tipos de terreno	44
4.2.2 Problemas de diseño	46
4.2.3 Posibles soluciones	47

	pág.
5. PLANTEAMIENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE LA MOVILIDAD	49
5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO	49
5.2 PLANTEAMIENTO DEL MODELO	49
5.3 DESARROLLO DEL MODELO	51
5.3.1 Desarrollo del Modelo aplicado al Metro de Sao Paulo	51
5.3.1.1 Aplicación del modelo	53
5.3.1.2 Resultados obtenidos	56
5.3.1.2 Análisis de los resultados	60
5.3.2 Desarrollo del modelo aplicado al Metro de Bogotá	60
5.3.2.1 Aplicación del modelo	61
5.3.2.2 Resultados obtenidos	62
5.3.2.3 Análisis de los resultados	64
6. CONCLUSIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Infraestructura de la Secretaría de Transporte Metropolitano -STM de Sao Paulo	19
Figura 2. Oficinas de Coordinación Técnica	19
Figura 3. Logotipo de Metro de Sao Paulo	20
Figura 4. Junta Directiva Metro de Sao Paulo	20
Figura 5. Consejo Administrativo Metro de Sao Paulo	21
Figura 6. Consejo Fiscal del Metro de Sao Paulo.	21
Figura 7. Normas Implementadas en Metro de Sao Paulo	24
Figura 8. Túnel da Anhangabaú, SP	27
Figura 9. Estación Ibirapuera	29
Figura 10. Caracterización de usuarios metro.	31
Figura 11. Indicaciones Funcionamiento Bloque Fijo	33
Figura 12. Indicaciones Funcionamiento Bloque Móvil	33
Figura 13. Metro de superficie	36
Figura 14. Vía Superficial del Metro	37
Figura 15. Metro Elevado en Sao Paulo	37
Figura 16. Metro Elevado en Sao Paulo	38
Figura 17. Metro Subterráneo de Sao Paulo	38
Figura 18. Incorporación de Cigüeñal con Hormigón Prefabricado	40
Figura 19. Etapa 1 de la Incorporación del Cigüeñal	40
Figura 20. Etapa 2 de la Incorporación del Cigüeñal	41
Figura 21. Etapa 3 de la Incorporación del Cigüeñal	41
Figura 22. Sesión Típica de las Estaciones de Brigadeiro y Trianon-MASP, Utilizando Método Mixto	42
Figura 23. Mapa Geotécnico de Bogotá (2010) con División por Tramos	45
Figura 24. Suelo en tramos I y II.	46
Figura 25. Suelo Tramo III y Parte del Tramo IV.	47
Figura 26. Función Objetivo	50
Figura 27. Restricciones	50



## LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Demanda de Pasajeros Año 2015	30
Cuadro 2. Estructura Física Metro SP.	30
Cuadro 3. Indicadores del Sistema Metro	31
Cuadro 4. Datos de Variables para Línea 1-Azul Metro de Sao Paulo.	52
Cuadro 5. Datos de Variables para Línea 2-Verde Metro de Sao Paulo	52
Cuadro 6. Datos de Variables para Línea 3-Roja Metro de Sao Paulo	52
Cuadro 7. Datos de Variables para Línea 5-Purpura Metro de Sao Paulo	53
Cuadro 8. Datos de Variables para Línea 15-Plata Metro de Sao Paulo	53
Cuadro 9. Table d (a,b) Demanda de Viaje Desde a o Hacia b	54
Cuadro 10. Table t (m,n) Tiempo de Viaje en el Tramo mn (mins)	55
Cuadro 11. Model Statistics SOLVE tráfico Using NLP From line 60	56
Cuadro 12. Resultados Primera Restricción	59
Cuadro 13. Datos de Variables para Línea 1 Metro de Bogotá	61
Cuadro 14. Table d(a,b) Demanda de Viaje Desde a o Hacia b	62
Cuadro 15. Table t(m,n) Tiempo de Viaje en el Tramo mn (mins)	62
Cuadro 16. Model Statistics SOLVE trafico Using NLP From line 52	64

## INTRODUCCIÓN

Las diferentes sociedades han mantenido un constante interés por generar nuevos y mejores modos de relación entre estas, siendo la organización de civilizaciones objeto de numerosos y variados estudios, partiendo de la explicación de la distribución y jerarquización de espacios urbanos destinados a brindar diferentes servicios a una población de similares características, donde cabe mencionar desde el trabajo de Christaller que determina “la Teoría de los Lugares Centrales”<sup>1</sup>, hasta investigaciones como las de Raffestin que abarca conceptos de la dinámica de las ciudades, complementándolas también con aportes de Magrinya que comprende un enfoque de las redes de transporte y de las telecomunicaciones predominando en una sociedad racional, teniendo una perspectiva global integradora con estrategia y sostenibilidad que ayuden a identificar su dinámica interna eficaz.

Desde el punto de vista económico y social, el transporte ha venido cobrando importancia por las funciones que éste comprende como hilo conductor de la población y su acceso a una mayor integración generando amplia repercusión en el normal desarrollo de las relaciones humanas asociadas a actividades ya sea de trabajo o diversión.

La implementación correcta y eficiente de modelos de transporte traen consigo efectos económicos de los movimientos de personas y mercancías siendo necesario contar con una adecuada infraestructura acorde a los requerimientos de montaje y a las necesidades de la población, que junto a la influencia que tiene en las relaciones sociales al dar beneficios asociados a la mejora en servicio de transporte o reducción de tiempo necesario para realizar determinados desplazamientos, se verá reflejado en términos cuantitativos como su método de valoración y el análisis costo-beneficio para impulsar alternativas de inversión.

---

<sup>1</sup> CHRISTALLER, W. Die Zentralen Orte in Süddeutschland. Gustav Fischer Verlag, Jena. English translation: The central places of southern Germany. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. p. 33

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 ANTECEDENTES

El Metro de São Paulo es el sistema metropolitano de la ciudad de São Paulo, operado por la empresa de capital mixto del estado de São Paulo Companhia do Metropolitano de São Paulo. Fundada en abril de 1968, la empresa es responsable por el planeamiento, proyecto, construcción y operación del sistema de transporte metropolitano en la Región Metropolitana de São Paulo. Teniendo la mayor parte de su control accionario asociada al gobierno del estado, es subordinada a la Secretaria de Transportes Metropolitanos del Estado de São Paulo. Integra también la Red Metropolitana de Transporte de São Paulo. La empresa privada ViaQuatro opera la recién inaugurada línea 4 del sistema. El sistema posee actualmente una extensión de 74,3 kilómetros de ferrovías distribuidas en cinco líneas, conectadas por 64 estaciones<sup>2</sup>.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**1.2.1 Descripción del problema.** Los mejora en movilidad en distintas ciudades del mundo a través de métodos implementados en un sistema de transporte público, con sus distintas características, evidencian la importancia de técnicas eficientes que tengan en cuenta tanto la calidad de vida de la sociedad como también la afectación ambiental y el crecimiento de la economía.

**1.2.2 Formulación del problema.** En el caso a estudiar sobre el metro de Sao Paulo, en donde se conocen los métodos usados para su implementación como lo son subterráneos y elevados, se analizaran los procedimientos y tácticas llevados a cabo para cumplir con el objetivo principal de mejorar la movilidad, desarrollar la infraestructura del país y ampliar la integración de su comunidad con eficientes puntos de interconexión rápida y asequible.

Se considerará cada método implementado y se estudiarán las diferentes alternativas de ejecución y así, conociendo las características socioeconómicas y de infraestructura que presenta nuestro país, y en particular la ciudad de Bogotá, determinar qué alternativa o alternativas serían las más favorables para la implementación de un sistema público de transporte de similares características en nuestro territorio, que brinde los mismos beneficios en cuanto a mejora de movilidad se refiere.

---

<sup>2</sup> TRENEANDO. El choque de dos trenes en el metro de Sao Paulo deja cerca de cuarenta heridos [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 20 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://treneando.com/2012/05/17/el-choque-de-dos-trenes-en-el-metro-de-sao-paulo-deja-cerca-de-cuarenta-heridos/>>

### **1.3 OBJETIVOS**

**1.3.1 Objetivo general.** Analizar los métodos y eficiencia implementados en la gestión y desarrollo del metro de Sao Paulo como base para análisis de procedimientos aplicables a proyectos en Bogotá (Colombia).

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Identificar condiciones y características del sector del servicio público de transporte, Caso - Metro de Sao Paulo.
- Analizar la metodología implementada en el metro de Sao Paulo para mejora de la movilidad y capacidad de transporte.
- Determinar relaciones particulares entre las características del sistema de transporte público del metro de Sao Paulo y las condiciones en Colombia para una implementación similar.
- Plantear un modelo matemático que permita analizar el esquema funcional del metro en Sao Paulo y Bogotá y sugiera modificaciones que se puedan llevar a cabo como forma de optimización del sistema metro.

### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

La investigación acerca de la eficacia en los métodos de transporte nos permite tratar a profundidad el desarrollo que conlleva la movilidad en una ciudad y la influencia en todos los aspectos que se vinculan con el progreso de la sociedad, tales como el medio ambiente, el crecimiento económico, la infraestructura física y la fructificación social, encaminando a la ciudad hacia un desarrollo sostenible.

Con este estudio se busca tomar como ejemplo un método ya implementado y analizar los resultados que se obtendrían al aplicar sus características a un nuevo plano estructural y conocer de antemano que ajustes serían necesarios para su correcto funcionamiento teniendo como base un método actual ya puesto en funcionamiento y con un rendimiento eficaz.

## 1.5 DELIMITACIÓN

**1.5.1 Espacio.** El desarrollo del presente proyecto se realiza en base a la visita realizada a la Companhia do Metropolitano de Sao Paulo Metro, que en cierta medida limitó la conferencia a espacios reducidos de reunión, por lo que se conoció sin profundidad la infraestructura perteneciente al manejo sistemático y metodológico organizacional de esta compañía, fundamento principal de la información aquí plasmada.

**1.5.2 Tiempo.** El propósito de culminación de este proyecto se plantea para un espacio de tiempo de cuatro meses, tiempo en el cual se modelará de la forma más precisa posible la información de la Companhia do Metropolitano de Sao Paulo Metro junto a información obtenida de la investigación que el proyecto así lo requiera.

**1.5.3 Contenido.** Se manejará de manera oportuna y precisa la información recogida de las conferencias dadas por la Companhia do Metropolitano de Sao Paulo Metro, teniendo como limitante el tiempo de la visita que no permitió cumplir con el objetivo de responder a todas las dudas e inquietudes que con el planteamiento de este proyecto se habían generado, razón por la cual se buscará respuesta basándose en otras fuentes que alimenten la información contenida y cumplan con el propósito principal de este proyecto.

**1.5.4 Alcance.** Se brinda la información aquí contenida como base para un desarrollo y ejecución precisa, en caso que aquí se requiera con fundamento conocido de primera mano en el exterior, que ayudará a la solvencia de problemas presentados en la ciudad de Bogotá (Colombia) que tengan causas similares a los ya vividos antiguamente en Sao Paulo (Brasil), que dieron como respuesta el planteamiento y ejecución de ideas ahora presentes en este proyecto, enmarcadas como la solución óptima a la problemática estudiada.

## 1.6 MARCO REFERENCIAL

### 1.6.1 Marco teórico.

**1.6.1.1 Transporte.** Es un medio de traslado de personas o mercancías de un lugar a otro, y está considerado como una actividad del sector terciario. “El transporte permite el crecimiento económico y las posibilidades de desarrollo de una nación. Cada día se llevan a cabo en el mundo millones de desplazamientos de mercancías, el transporte facilita el intercambio comercial entre las regiones y los países, y las actividades económicas se ven favorecidas si los medios de transporte son buenos, rápidos, seguros y baratos”<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> DEFINICIÓN DE. Definición de Transporte [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://conceptodefinicion.de/transporte/>>

**1.6.1.2 Movilidad.** En la actualidad la agenda social latinoamericana es en esencia una agenda de desarrollo urbano.

Casi el 80% de la población de la región vive en centros urbanos y se llegará a cerca del 90% en las próximas décadas. Por ello, los esfuerzos para afrontar una mayor inclusión social y luchar contra la pobreza se concentran en atender las poblaciones residentes en las grandes ciudades.

La movilidad urbana es entonces un factor determinante tanto para la productividad económica de la ciudad como para la calidad de vida de sus ciudadanos y el acceso a servicios básicos de salud y educación.

El documento Observatorio de Movilidad Urbana para América Latina concluye que los sistemas de transporte urbano masivo en la región se han convertido en oportunidades para lograr avances importantes en la inclusión de los ciudadanos que habitan en las ciudades<sup>4</sup>.

**1.6.1.3 Crecimiento económico.** Se refiere al incremento porcentual del producto bruto interno de una economía en un período de tiempo. “El crecimiento es una medida del bienestar de la población de un país o región económica y del éxito de las políticas económicas. Implícitamente, se supone que un elevado crecimiento económico es beneficioso para el bienestar de la población, es decir que un elevado crecimiento económico sería un resultado deseado por las autoridades políticas y por la población de un país”<sup>5</sup>.

**1.6.1.4 Crecimiento demográfico.** El crecimiento demográfico es el cambio de una población en el tiempo. “Hay una variedad de indicadores disponibles para medir el crecimiento de la población humana: - La tasa de crecimiento natural: determina qué tan rápido crecerá la población y se determina restando la tasa de mortalidad (número de defunciones por cada 1.000 al año) de la tasa de natalidad (número de nacimientos por cada 1.000 al año.) - La tasa de crecimiento de población: esta es una medida más sofisticada que toma en cuenta otros factores como la migración”<sup>6</sup>.

## **1.6.2 Marco conceptual.**

**1.6.2.1 Transporte público.** Dentro de las necesidades básicas de los habitantes de una ciudad, está la de moverse o trasladarse de un lugar a otro, estas sociedades hacen uso de diversos medios como: a tracción animal, a pie, la

---

<sup>4</sup> BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA. Qué es movilidad urbana [en línea]. Madrid: El Banco [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2013/08/que-es-movilidad-urbana/>>

<sup>5</sup> ECONOLINK. Crecimiento Económico [en línea]. Buenos Aires: La Empresa [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.econlink.com.ar/economia/crecimiento/crecimiento.shtml>>

<sup>6</sup> BENNETT, Rachel. ¿Qué es el crecimiento demográfico? [en línea]. Bogotá: Leaf Group [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.ehowenespanol.com/crecimiento-demografico-sobre\\_325116/](http://www.ehowenespanol.com/crecimiento-demografico-sobre_325116/)>

bicicleta, motocicleta o vehículos de dos tiempos, automóvil, autobús, tranvía, trolebús, tren elevado o metro.

No es sino desde mediados del siglo XIX que se comienza a considerar al transporte como un asunto gubernamental de interés social y ya en la primera década del siglo XX en Buenos Aires Argentina se construyó la primera línea subterránea de América Latina, luego Curitiba Brasil sirve de inspiración a los países latinoamericanos con la implementación de los sistemas BRT (Bus Rapid Transit) o sistemas troncoalimentados, que sirven de plataforma en ámbitos de desarrollo, apoyo estatal y condiciones empresariales.

El hombre toma conciencia que el transporte público es parte fundamental del desarrollo de los pueblos y realiza grandes esfuerzos para estudiar, planificar, diseñar e implementar sistemas de transporte que sean eficientes, que mejoren la calidad de vida y que se adapten constantemente a los constantes cambios de modernización y desarrollo de las ciudades<sup>7</sup>.

**1.6.2.2 Sistema de transporte público.** Comprende los medios de transporte en que “los usuarios o pasajeros son servidos por terceros, esta prestación puede ser por parte de empresas públicas, privadas o mixtas; un sistema de transporte público está compuesto por una serie de variables de índole humana, legislativo, material e infraestructura, que en interrelación actúan y hacen posible el servicio del transporte público a una determinada sociedad, de estas variables depende la calidad de prestación”<sup>8</sup>.

Dentro de los beneficios de los Sistemas de Transporte Público están:

- Los vehículos del Sistema de Transporte Público optimizan la ocupación del uso de suelo, ya que dependiendo del tipo de vehículo pueden transportar una mayor cantidad de pasajeros.
- En términos de contaminación, el transporte público es el medio menos contaminante por pasajero, debido a la optimización y uso de energía.
- Los transportes públicos con carril exclusivo o subterráneos no sufren problemas de atascos y contribuyen a que haya menos congestión vehicular.  
Para que un sistema de transporte público se desarrolle correctamente, necesita de tres actores fundamentales:
  - Ente Regulador o gubernamental, es un organismo autárquico de derecho público

---

<sup>7</sup> KRAJNIK, Renato y RIZO, Rodrigo. Sistema vial y transporte público de Curitiba [en línea]. Bogotá: Slideshare [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.slideshare.net/10301632/sistema-vial-y-de-transporte-de-curitiba>>

<sup>8</sup> FIGUEROA SANTOS, Ingrid y CASTAÑEDA GALLEGOS, Juan Eduardo. Caracterización de los criterios logísticos clave de transporte urbano de pasajeros para el barrio Belisario Caicedo de la comuna 20 en Santiago de Cali. Cali: Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de Maestría en Logística Integral, 2013. p. 20.

que tiene plena capacidad jurídica para regular, controlar y planificar los diferentes sistemas de transporte.

➤ Prestador de servicio, empresario o transportista: es el ente ejecutor principal que realiza el trabajo operativo, el transportista está obligado a trasladar al usuario en las más óptimas condiciones sin estar limitado a la conducción de una unidad de transporte, la categoría es extensiva a cualquier grupo de personas que pertenezcan a una u otra área de servicio que contribuya al desenvolvimiento del sistema, sean estos: administrativos, mecánicos, operadores, entre otras.

➤ Los usuarios o pasajeros, es el grupo más numeroso de la industria del transporte, visto desde el punto de vista empresarial, es el consumidor final, a quien va dirigido el servicio y a quien se le debe la satisfacción en sus niveles más altos<sup>9</sup>.

### 1.6.2.3 Eficiencia.

Depende de la calidad humana o motora de los agentes que realizan la labor a realizar, para expedir un producto o servicio de calidad, es necesario comprender los todos los ángulos desde donde es visto, a fin de satisfacer todas las necesidades que el producto o servicio pueda ofrecer; es decir que es aquel talento o destreza de disponer de algo o alguien en particular con el objeto de conseguir un dado propósito valiéndose de pocos recursos, por ende hace referencia, en un sentido general, a los medios utilizados y a los resultados alcanzados<sup>10</sup>.

## 1.7 METODOLOGÍA

**1.7.1 Tipo de estudio.** La información relacionada con el desarrollo de este proyecto fue obtenida de la Visita Técnica Internacional promovida por la Universidad Católica de Colombia, conociendo de manera directa la Companhia do Metropolitano de Sao Paulo Metro, lugar en donde personalmente se recibieron las conferencias para conocer en aspectos profundizados el manejo sistemático y metodológico de este sistema de transporte.

### 1.7.2 Fuentes de información.

**1.7.2.1 Fuentes primarias.** Se tiene información de primera mano recibida en las conferencias de la Companhia do Metropolitano de Sao Paulo Metro así como también se complementarán todos los enfoques que este proyecto abarque por medio de la investigación sobre temas estrechamente relacionados con el tema a tratar.

Un complemento importante se dará al relacionar la información suministrada desde Sao Paulo, Brasil, con información que se obtenga en Colombia, específicamente

---

<sup>9</sup> *Ibíd.*, p. 21

<sup>10</sup> DEFINICIÓN DE. Definición de Eficiencia [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://conceptodefinicion.de/eficiencia/>>



en la ciudad de Bogotá, donde se buscará profundizar la aplicación de un sistema semejante por medio de similitudes entre ambas ciudades.

**1.7.2.2 Fuentes secundarias.** Libros, guías, informes, artículos, material documental relacionado con el tema de investigación.

## **1.8 DISEÑO METODOLÓGICO**

La investigación se realizará con una base descriptiva y correlacional en donde se podrá conocer de manera amplia cada aspecto por separado tanto en Brasil como en Colombia.

Se busca caracterizar cada sector propuesto con una descripción de variables que seguido de esto se irán relacionando para finalmente plantear una propuesta en donde se parte de similitudes entre problemáticas que ya conocidas en un punto se pueden impartir a otro para obtener los mismos resultados de mejora.

1.8.1 Fases. El trabajo se desarrolló mediante las siguientes fases

- Fase 1 Identificación de condiciones y características del sector del servicio público de transporte, Caso - Metro de Sao Paulo.
- Fase 2 Análisis de la metodología implementada en el metro de Sao Paulo para mejora de la movilidad y capacidad de transporte.
- Fase 3 Identificación y determinación de relaciones particulares entre las características del sistema de transporte público del metro de Sao Paulo y las condiciones en Colombia para una implementación similar.
- Fase 4 Planteamiento del modelo matemático que permita analizar el esquema funcional del metro en Sao Paulo y Bogotá y sugiera modificaciones que se puedan llevar a cabo como forma de optimización del sistema metro.
- Fase 5 Conclusiones y recomendaciones finales

## 2. IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

### 2.1 LA EMPRESA COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SAO PAULO METRO

**2.1.1 Identificación de la empresa.** La Compañía Metropolitana del Metro de Sao Paulo fue fundada el 24 de Abril de 1968, empresa de capital mixto del estado de Sao Paulo creada como central de operación del sistema metropolitano de la ciudad brasileña y responsable de la planeación, proyecto, construcción y operación del sistema de transporte metropolitano de Sao Paulo.

Establecida en sociedad y con mayoría accionaria con el gobierno del estado, la Secretaría de Transportes Metropolitanos del Estado de Sao Paulo, la Red Metropolitana de Transporte de Sao Paulo y la empresa privada ViaQuatro.

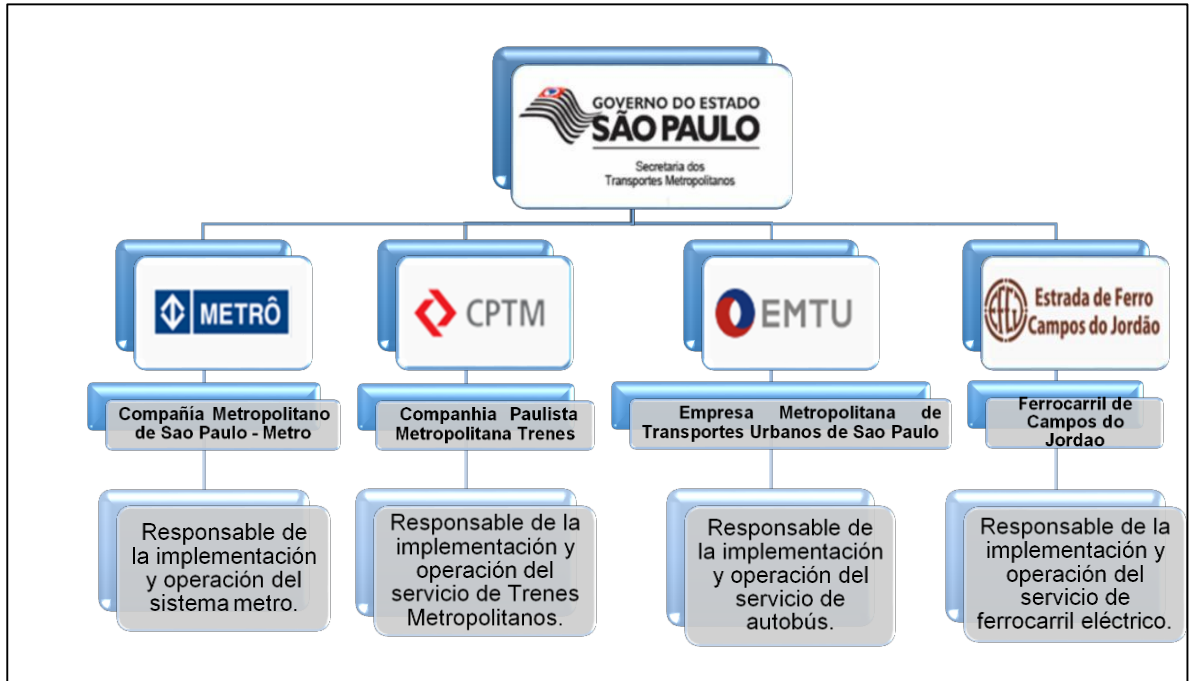
El sistema comenzó su operación en septiembre de 1974, logrando una amplia extensión hasta la actualidad. Cuenta con cinco líneas de operación en una red ferroviaria de un total de 68,5 kilómetros, interconectadas por 61 estaciones y con 154 trenes. Adicionalmente, en 2010 el Consorcio ViaQuatro abrió el primer tramo de la Línea 4-Amarilla, entregando hasta el año 2014 una línea de 8,9 kilómetros, con 7 estaciones y 14 trenes.

Trabajando en interconexión gratuita con la Companhia Paulista de Trenes Metropolitanos (CPTM), se llegan a transportar cerca de cinco millones de pasajeros diariamente y se espera que con las obras de integración con la red CPTM se llegue a una extensión de 240 kilómetros, convirtiéndose en uno de los sistemas de transporte más extensos en Latinoamérica.

**2.1.2 Empresas asociadas.** La Secretaría de Transporte Metropolitano – STM hace parte de la infraestructura del Gobierno del Estado de Sao Paulo, vinculada con cuatro organizaciones que en asocio tienen como fin común poner en marcha la política estatal de transporte urbano de pasajeros a áreas metropolitanas, comprendiendo la unión de los sistemas de metro, tren, autobús y onibus.

El manejo del sistema de transporte público de pasajeros e infraestructura vial está enmarcado dentro del deber ser de esta sociedad en donde se abarca la organización, coordinación, operación y supervisión de dicho sistema (véase la Figura 1).

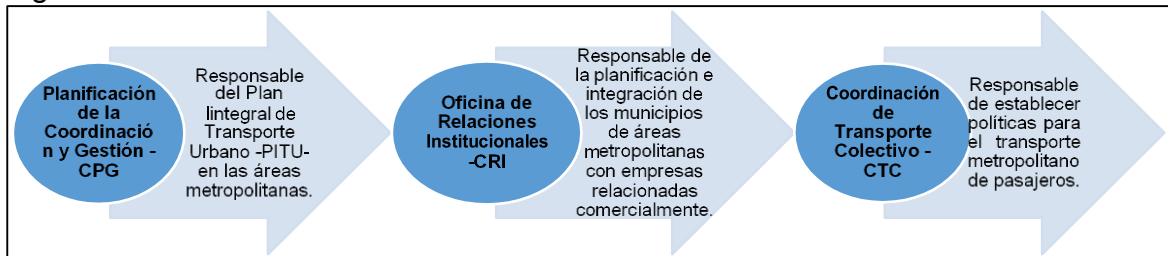
Figura 1. Infraestructura de la Secretaría de Transporte Metropolitano -STM de Sao Paulo



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Organigrama Infraestructura

Se manejan tres oficinas de coordinación técnica distribuidas según funcionalidad de la siguiente manera (véase la Figura 2).

Figura 2. Oficinas de Coordinación Técnica



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Coordinación Técnica

## 2.2 MISIÓN Y VISIÓN

**2.1.1 Misión.** Prestar servicios de transporte público con calidad y calidez, a través de una red que está más cerca de llevar a la gente cada vez más lejos.

**2.1.2 Visión.** Ser la opción de transporte preferida en el área metropolitana de Sao Paulo, ofreciendo un servicio de calidad, atendiendo a las necesidades de los

ciudadanos de forma cordial y agradable, haciendo de su viaje una experiencia más agradable, con prontitud y respeto.

## 2.3 IMAGEN CORPORATIVA

A continuación, se presenta el logotipo corporativo de la empresa (véase la Figura 3).

Figura 3. Logotipo de Metro de Sao Paulo



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Imagen corporativa

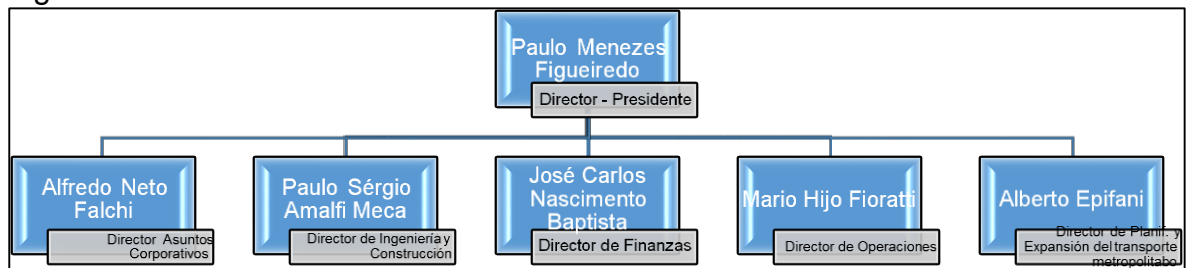
La compañía, a través de las formas cuadradas presentes en el logotipo, busca transmitir una percepción de asociación; formando bordes que se relacionan con el concepto del dominio de la racionalidad, al mismo tiempo que van en dirección a los cuatro puntos cardinales.

También se incorporan significados como la sobriedad, la firmeza, fiabilidad y la igualdad de los lados da referencia a la exactitud, el cálculo, la perfección matemática y la ingeniería.

## 2.4 ORGANIGRAMA DE LA EMPRESA

**2.4.1 Junta directiva.** A continuación, se puede observar el organigrama de la junta directiva del metro de Sao Paulo (véase la Figura 4).

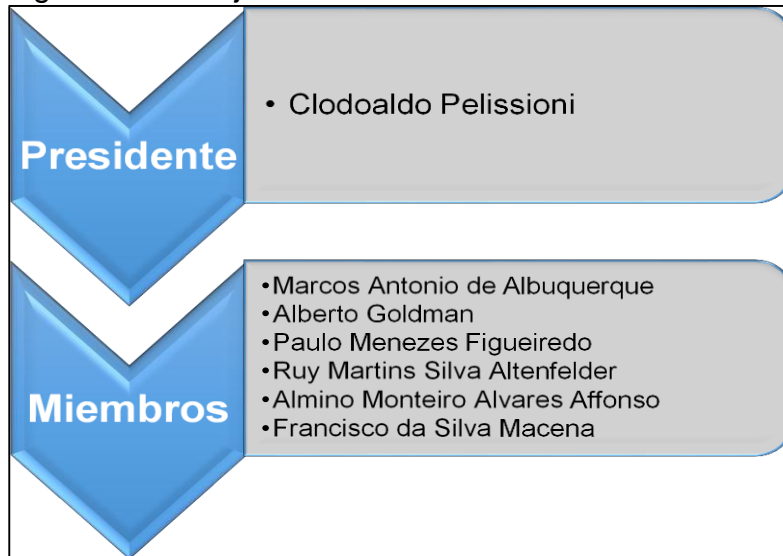
Figura 4. Junta Directiva Metro de Sao Paulo



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Estructura organizacional

**2.4.2 Consejo administrativo.** A continuación, se puede observar la composición del consejo directivo del metro de Sao Paulo (véase la Figura 5).

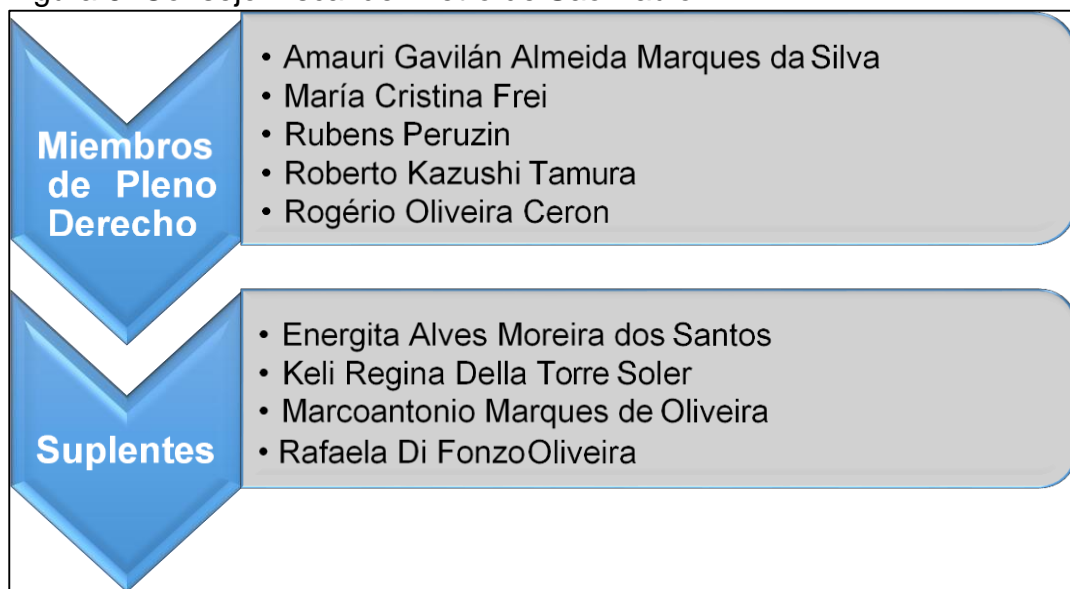
Figura 5. Consejo Administrativo Metro de Sao Paulo



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Estructura organizacional

**2.4.3 Consejo fiscal.** A continuación, se puede observar la composición del consejo fiscal del metro de Sao Paulo (véase la Figura 6).

Figura 6. Consejo Fiscal del Metro de Sao Paulo.



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Estructura organizacional

## **2.5 LEGISLACIÓN SOBRE TRANSPORTE DE PASAJEROS**

El metro de Sao Paulo cuenta con una legislación sobre transporte de pasajeros implementada desde 1998, la cual consta de 1071 páginas con 375 reglas que se imparten sobre la unión, el Estado de Sao Paulo, Sao Paulo y el sistema metro.

Esta legislación se organizó con el fin de determinar las disposiciones legales y las normas en relación a los actores involucrados directa o indirectamente con el servicio e instrumentos del sistema metro, permitiendo determinar de manera clara y precisa las condiciones para temas como la regulación de la gratuidad del transporte público, el transporte de las personas con discapacidad, las concesiones de servicios de transporte, los vales de transporte y las violaciones al tráfico, entre otros.

## **2.6 CÓDIGO DE ÉTICA Y CONDUCTA**

El Código de Ética y conducta aplicado en esta institución tiene como fin el fortalecimiento de su imagen, por medio de la estandarización de criterios en la empresa, dando apoyo a la toma de decisiones y la oportunidad de integrar a los empleados fomentando su compromiso con la compañía.

**2.6.1 Ética.** Se promulgan principios y valores que dirijan el comportamiento y la actitud del hombre ante la sociedad.

**2.6.1.1 Código de ética y conducta.** Conjunto de principios y normas encaminados a dirigir las acciones y actividades de la empresa y todos quienes la conforman: directivos, socios, empleados y clientes, esto con el fin de garantizar el cumplimiento de la misión de la compañía del metro.

**2.6.1.2 Ética y conducta.** Equipo integrado por empleados en representación de cada área, siendo delegados por el Director – Presidente y que tienen el compromiso de orientar, asesorar, recomendar y educar a todos los demás integrantes de la organización sobre las prácticas establecidas en el Código de Ética y Conducta.

**2.6.2 Valores.** Los valores que se destacan en el accionar de la Compañía del Metro son:

- Respeto
- Compromiso
- Eficiencia
- Responsabilidad

- Cooperación
- Transparencia
- Competencia
- Innovación

**2.6.3 Conducta.** El comportamiento frente a los diferentes actores involucrados con la Compañía del Metro es estimulado por las buenas prácticas, tales como:

➤ **Clientes**

- ✓ Educación, respeto y prontitud
- ✓ Prestación de un servicio seguro y eficiente

➤ **Sociedad**

- ✓ Aprecio por la ciudadanía
- ✓ Acceso a información
- ✓ Desarrollo sostenible

➤ **Empleados**

- ✓ Respeto por el sigilo y la información confidencial estratégica
- ✓ Rendimiento con responsabilidad social, económica y ambiental
- ✓ Respeto a la diversidad
- ✓ Velar por la buena imagen, el patrimonio y los intereses de la organización
- ✓ Uso responsable de los recursos

➤ **Accionistas y organismos de regulación y control**

- ✓ Rendición de cuentas
- ✓ Agilidad en respuesta a las solicitudes de información

➤ **Proveedores**

- ✓ Mantener una relación equitativa, imparcial e igualitaria
- ✓ Selección y contratación en base a criterios técnicos y legales

➤ **Demás modos de transporte**

- ✓ Actuación en conjunto para ofrecer resultados eficaces para la sociedad

➤ **Asociaciones**

- ✓ Dialogo abierto, constructivo y respetuoso, buscando el equilibrio de intereses

➤ **Prensa**

- ✓ Brindar información con transparencia, prontitud e imparcialidad.

## 2.7 POLÍTICA INTEGRADA

En esta política implementada se integran la Calidad, Medio Ambiente, Seguridad y Salud Ocupacional, con el objetivo de prestar un servicio de transporte público con sostenibilidad e innovación tecnológica, complementado con las mejores prácticas de gestión de calidad, aspectos ambientales y riesgos laborales, para satisfacer las necesidades de los clientes, la comunidad y las partes interesadas.

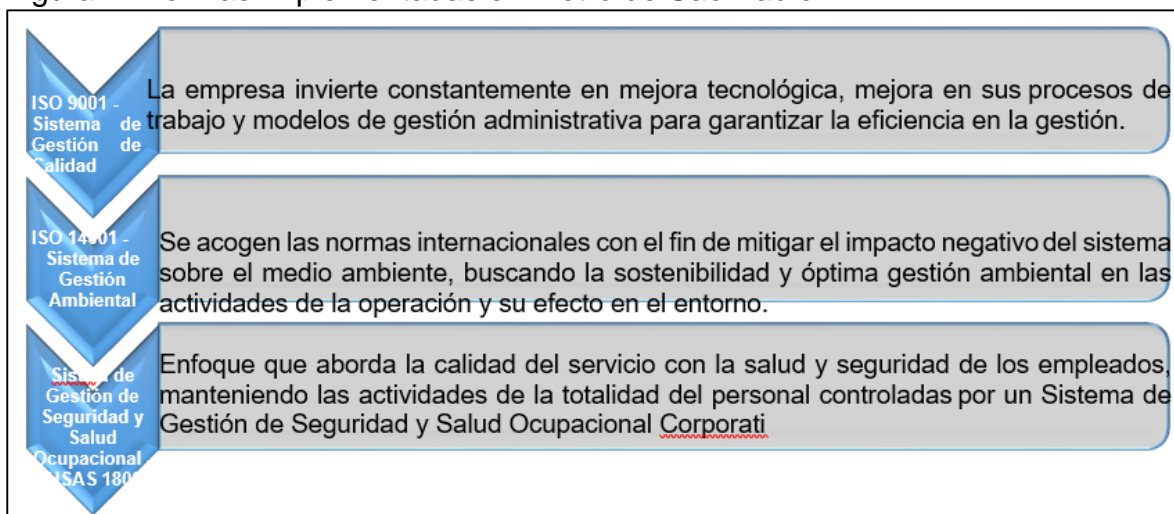
Los compromisos adquiridos con esta política ofrecen el cumplimiento de aspectos como:

- Promover la interacción y mejora continua de los procesos;
- Promover la seguridad y salud en el trabajo, evitando lesiones y enfermedades relacionadas con este;
- Asegurar la preservación del ambiente por medio de la optimización en el uso de recursos naturales y evitando altos niveles de contaminación;
- Cumplir con requisitos legales adquiridos y demás compromisos.

## 2.8 CERTIFICACIONES

El Metro de Sao Paulo cuenta actualmente con sistemas de gestión implementados y certificados, basados en las siguientes normas (véase la Figura 7).

Figura 7. Normas Implementadas en Metro de Sao Paulo



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Estructura organizacional



## 2.9 EL SISTEMA METRO Y SU EVOLUCIÓN

El Metro de Sao Paulo actualmente está compuesto por cinco líneas de operación, conectadas por 64 estaciones a lo largo de 74,3 kilómetros de vías ferroviarias, atendiendo regiones dentro de los límites municipales, siendo aún insuficiente para cubrir toda el área rural de la ciudad de Sao Paulo, razón por la cual se trabaja conjuntamente con la Compañía Paulista de Trenes Metropolitanos (CPTM), la cual da cubrimiento a una mayor extensión de territorio, ampliando a 260,8 kilómetros el total de vías de transporte urbano, agregadas a través de 93 estaciones más que hacen parte de otras seis líneas de operación.

Las cinco líneas que conforman el sistema del metro de Sao Paulo están diferenciadas por colores y son las siguientes:

- Línea 1-Azul: Jabaquara – Tucuruvi
- Línea 2-Verde: Vila Prudente – Vila Madalena
- Línea 3-Roja: Corinthians-Itaquera – Palmeiras-Barra Funda
- Línea 4-Amarilla: Luz – Butantã (Administrado por ViaQuatro)
- Línea 5-Purpura: Capão Redondo – Largo Treze
- Línea 15-Plata: Vila Prudente – Oratorio

Adicionalmente, la interconexión en la que se trabaja con la Compañía de Trenes Metropolitanos de Sao Paulo, agrega seis líneas más de red ferroviaria que se identifican de la siguiente manera:

- Línea 7-Rubí: Luz – Jundiá
- Línea 8-Diamante: Julio Prestes – Amador Bueno Línea 9-Esmeralda: Osasco – Grajaú
- Línea 10-Turquesa: Brás – Rio Grande Da Serra Línea 11-Coral: Guaianases – Estudiantes
- Línea 11-Coral Expresso Leste: Luz – Guaianases Línea 12-Safiro: Brás – Calmon Viana

La operación comercial de la Línea 1-Azul comenzó en el año 1974 y a lo largo de los siguientes ocho años continuó la construcción y el funcionamiento de las siguientes dos líneas, la Línea 2-Verde y la Línea 3-Roja.

Para la época final del año 2004, se promovió el interés por la ampliación del sistema, lo que llevó a aumentar la capacidad de las tres líneas ya en actividad, y más tarde, en el año 2010, a trabajar en asocio con el Consorcio ViaQuatro quien esquematizó y ejecutó la cuarta línea del metro, Línea 4-Amarilla, y quien es el encargado de su manejo y control hasta la actualidad.

Desde el año 2012 comenzaron los estudios que determinaron la creación de una nueva línea de metro, siendo su apertura en el año 2014, con 11,4 kilómetros de la denominada Línea 5-Purpura y una línea complementaria de 28 kilómetros llamada Expresso Aeroporto que va hasta el Aeropuerto Internacional de Sao Paulo – Guarulhos; además de la ampliación de la vía ferroviaria para mayor cobertura del sistema metropolitano de trenes, que abarcaran un mayor servicio urbano para la alimentación del sistema del metro.

En el año 2015, fue el comienzo de las operaciones de la Línea 15-Plata por sistema monorraíl, siendo este un sistema nuevo e innovador en Brasil, que cuenta con un tramo de 2,3 kilómetros y alimenta a la Línea 2-Verde del metro y amplía la longitud de la Línea 4-Amarilla.

Las estadísticas del sistema metro consolidan que el servicio es ofrecido a una cantidad que oscila los 4,7 millones de pasajeros por día. El trabajo en conjunto que se realiza con la Compañía de Trenes Metropolitanos arrojó que diariamente se movilizan alrededor de 8 millones de pasajeros en los dos sistemas incorporados, dejando aparte de los 4,7 millones de pasajeros de metro, una cantidad próxima a los 3,3 millones de personas que se movilizan por medio ferroviario<sup>11</sup>.

Desde su inauguración, en el año 1974 hasta el año 2015 se transportaron 25,6 billones de pasajeros, lo que afianzó al sistema como uno de los transportes con mayor movilidad en Brasil y Latinoamérica.

---

<sup>11</sup> MOREIRA, Alexandre. Memoria da Engenharia: Transporte urbano, passado e futuro. Webdesigner: Engenho Editora Técnica, 2002. p. 4

### 3. SISTEMA DE TRANSPORTE METRO EN SAO PAULO (BRASIL)

#### 3.1 MOVILIDAD EN SAO PAULO

En una ciudad como Sao Paulo, principal urbe en la Región Metropolitana, con aproximadamente 11.244.369 habitantes y una de las tasas más altas de crecimiento de la población, el tema de la movilidad es un aspecto de gran interés que ha sido impulsado por el desarrollo industrial que se ha venido dando desde el siglo XX, fomentando además el crecimiento en negocios, comercio e influencia dentro de la región, lo que la ubica como una de las megalópolis más importantes de Brasil y América Latina (véase la Figura 8).

Figura 8. Túnel da Anhangabaú, SP



Fuente. SALLES, Luciane. Brasil: Como resolver a crise na mobilidade urbana? [en línea]. Sao Paulo: Global Voices [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://pt.globalvoices.org/2013/07/28/brasil-como-resolver-a-crise-na-mobilidade-urbana/>>

La movilidad urbana en Brasil se mantuvo en crisis por décadas debido al alto crecimiento de la población, además del fomento de transporte individual que fue promovido por la política de inversión del gobierno, lo que impulsó a un mejor manejo de este sector con la búsqueda de soluciones que planteen mejora a la situación que se vivía y que estaba trayecto consecuencias negativas en los aspectos que afectan la calidad de vida de la población.

El Dr. Jaime Waisman, profesor de Transporte Público en la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo (USP), dice: “Essa crise existe e há bastante tempo. Cidades de menor porte estão aumentando progressivamente esses deslocamentos e isso reflete numa queda da mobilidade urbana. Um transporte público caro e de má qualidade gera um processo de exclusão social, cujo reflexo recai sobre a lentidão das cidades deixando-as menos interessantes para investimentos por causa da redução progressiva da mobilidade”<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup> SALLES, Luciane. Brasil: Como resolver a crise na mobilidade urbana? [en línea]. Sao Paulo: Global Voices [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://pt.globalvoices.org/2013/07/28/brasil-como-resolver-a-crise-na-mobilidade-urbana/>>

“Esta crisis existe desde hace mucho tiempo. Las ciudades más pequeñas se van sumando progresivamente a estos problemas y esto se refleja en el deterioro de la movilidad urbana. El transporte público, que es caro y de calidad pobre, lleva a un proceso de exclusión social que causa efectos colaterales en el desarrollo de las ciudades y las hace menos atractivas para las inversiones debido a la reducción progresiva de la movilidad<sup>13</sup>”.

Un estudio publicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) mostró que el 30% de la población ubicada en la zona metropolitana de Sao Paulo sufre trastornos mentales como consecuencia del estrés y el ritmo de vida acelerado que se vive en la ciudad a causa del tráfico. Por lo cual en 2012 se concertó en la Política Nacional de Movilidad Urbana, que para el año 2015 las ciudades con una cantidad superior a los 20.000 habitantes debían presentar un plan de movilidad que empezaría a regir a partir de ese año.

Es así como se han venido integrando una serie de diversos modelos de transporte urbanos como el metropolitano y el ferroviario que han logrado impulsar la mejora en la movilidad general de la ciudad al mismo tiempo que han generado un gran impacto positivo sobre la calidad de vida de la población.

Un sistema que viene pensado para todo tipo de pasajero, brindando comodidad y acceso total inclusive a personas con discapacidad física, además de un interés principal en mantener un sistema que no solo brinde un servicio óptimo, sino que también esté conectado con otros ámbitos como el ambiental, cultural y económico.

La contribución a una menor polución atmosférica, disminución del congestionamiento vial, exposiciones de arte y eventos culturales en las diferentes estaciones de todo el sistema de transporte urbano y puntos de transferencia gratuita entre sistemas son algunas de las ofertas que hacen de la movilidad en Sao Paulo una de las más desarrolladas en los últimos años y de mayor eficiencia para su comunidad.

### **3.2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA METRO DE SAO PAULO**

Como se ha descrito en el capítulo anterior, el Sistema del Metro de Sao Paulo viene distribuido por una red compuesta por 5 líneas pertenecientes a la Compañía del Metro de Sao Paulo, además de una línea incorporada a la red por el Consorcio ViaQuatro, y la operación integrada con la Compañía Paulista de Trenes Metropolitanos de Sao Paulo que agrega seis líneas al sistema de transporte urbano dando una amplia cobertura en el tema de movilidad a la ciudad.

---

<sup>13</sup> SALLES, Luciane. Crisis de movilidad urbana en Brasil [en línea]. Sao Paulo: Global Voices [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.globalvoices.org/2013/08/19/crisis-de-movilidad-urbana-en-brasil/>>

Para el caso específico del desarrollo de este proyecto, se da a conocer la caracterización de las cinco líneas del metro, administradas por la Companhia do Metropolitano de Sao Paulo Metro que son la Línea 1-Azul, Línea 2-Verde, Línea 3-Roja, Línea 5-Purpura y Línea 15-Plata y la Línea 4-Amarilla, administrada por el Consorcio ViaQuatro.

### 3.3 TARIFAS DEL METRO DE SAO PAULO

En todas las estaciones del sistema se puede adquirir en Taquilla el pasaje de abordaje. El billete único tiene un valor de 3,8 Reales (equivalente a \$3.200 pesos colombianos), que habilita para hacer hasta 4 transferencias dentro del sistema. Se trata de un billete integrado que permite hacer transbordo entre el metro y los otros medios de transporte urbano: el ómnibus y trenes de la ciudad.

Existe otra opción y es comprar la tarjeta electrónica y recargarla con varios viajes, lo cual significará un gran ahorro para el usuario. Esta tarjeta, denominada Fidelidade, se consigue en la Taquilla de todas las estaciones, se debe pagar por esta un valor de 2 reales (\$1.700 pesos/col) y recargarla con mínimo ocho pasajes (véase la Figura 9). Las tarifas que se manejan con esta tarjeta reciben un descuento de acuerdo a la cantidad de pasajes que se compran y son las siguientes:

- 8 viajes – 21,5 reales (2,69 reales/viaje)
- 20 viajes – 52,4 reales (2,57 reales/viaje)
- 50 viajes – 123 reales (2,46 reales/viaje)

Figura 9. Estación Ibirapuera



Fuente. El Autor.

La tarjeta Lazer es otro tipo de modalidad ofrecida por el sistema de transporte. Esta tarjeta solo está disponible para usar los fines de semana en un horario preestablecido que va desde la 18:00 horas del sábado hasta las 00:00 del domingo. De la misma manera que la tarjeta Fidelidade, esta se puede adquirir en la Taquilla de todas las estaciones por valor de 2 reales (\$1.700 pesos/col) y se debe recargar con mínimo 10 pasajes por 23,5 reales (\$19.800 pesos/col).

### 3.4 DEMANDA

El metro de Sao Paulo presenta la siguiente demanda de pasajeros (véase el Cuadro 1)

Cuadro 1. Demanda de Pasajeros Año 2015

DEMANDA	LINEA 1- AZUL	LINEA 2- VERDE	LINEA 3- ROJA	LINEA 4- PURPURA	LINEA 5- PLATA	RED
TOTAL	309.774	150.025	358.980	79.748	521	899.028
PROMEDIO DE DÍAS	1.059	531	1.211	269	5	3.073
MEDIA DE SÁBADOS	578	225	584	158	2	1.041
UN DOMINGO	325	136	414	83	1	959
MÁXIMO DIARIO	1.142	573	1.288	292	6	3.288

Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

### 3.5 ESTRUCTURA FÍSICA

En cuanto a estructura física, el metro de Sao Paulo tiene lo siguiente (véase el Cuadro 2)

Cuadro 2. Estructura Física Metro SP.

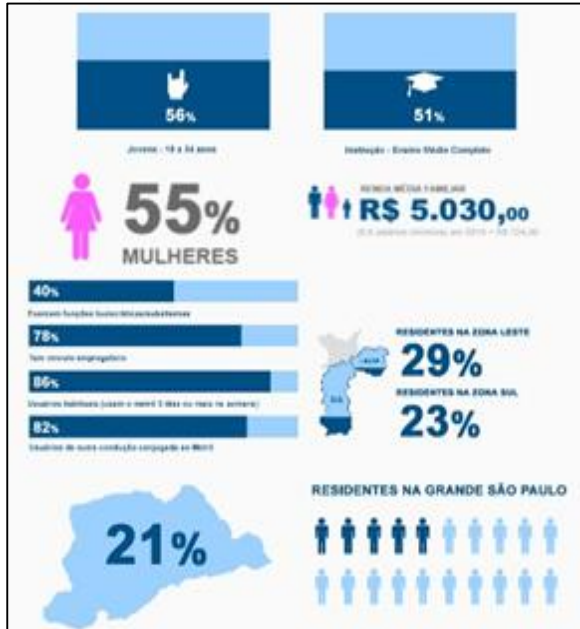
líneas	1- azul	2-verde	3-rojo	4-lila	15- plata	red
INICIO DE OPERACIONES COMERCIALES	1974	1991	1979	2002	2015	-
ESTACIONES	23	14	18	7	2	61
EXTENSIÓN ACTUAL DE LÍNEAS (KM)	20.2	14.7	22	9.3	2.3	68.5
ESTACIONES DE TRANSFERENCIA	3	3	1	-	1	4
ESTACIONES DE INTEGRACIÓN CON LÍNEA 4- AMARILLA	1	1	1	-	-	3
INTEGRACIÓN CON ESTACIONES DE CPTM	1	1	4	1	-	7
ESTACIONES CON TERMINALES DE AUTOBUSES URBANOS	6	2	10	5	-	22
ESTACIÓN CON TERMINALES DE AUTOBUSES	2	-	1	-	-	3
NÚMERO DE COCHES DE FLOTA	348	162	342	48	28	928
NÚMERO DE AUTOMÓVILES USADOS EN HORAS PICO	240	132	240	42	7	667
INTERVALO MÍNIMO ENTRE TRENES (SEGUNDOS)	119	144	104	260	436	-
VELOCIDAD MÁXIMA (KM/H)	87	87	87	68	90	-
VELOCIDAD COMERCIAL (KM/H)	32	33	40	38	52	-

Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

### 3.6 CARACTERIZACIÓN DEL USUARIO

Los usuarios del metro de Sao Paulo presentan las siguientes características (véase la Figura 10)

Figura 10. Caracterización de usuarios metro.



Fuente. COMPANHIA PAULISTA DE TRENS METROPOLITANOS CPTM. Información básica de la CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos 2015 – 2016 [en línea]. Sao Paulo: CPTM [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.cptm.sp.gov.br/a-companhia/Pages/a-companhia.aspx>>

### 3.7 INDICADORES

En 2015, 3,8 millones de usuarios se transportaron en promedio durante la semana, teniendo en cuenta las transferencias más entradas entre las líneas de la Compañía Metro de Sao Paulo (véase el

Cuadro 3. Indicadores del Sistema Metro

DEMANDA RECORD	RTA	USO DE LA RED	ESTACIÓN MÁS OCUPADA
El 14/11/2013 se estableció nuevo record de demanda con 4,2 millones de pasajeros.	El tiempo medio de viaje entre dos estaciones del sistema se estima en dos minutos.	El uso promedio del sistema, expresada por la relación del número de entradas de pasajeros en el año y ampliar la red fue de 13,1 millones en 2015.	Que circula en la estación Sé, teniendo en cuenta las entradas, salidas y transferencias entre las líneas 1 y 3 – Azul – Rojo, a unos 600 mil pasajeros en días laborales.

Fuente. COMPANHIA PAULISTA DE TRENS METROPOLITANOS CPTM. Información básica de la CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos 2015 – 2016 [en línea]. Sao Paulo: CPTM [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.cptm.sp.gov.br/a-companhia/Pages/a-companhia.aspx>>

### 3.8 OPERACIÓN DEL SISTEMA

La responsabilidad tan grande que acarrea el transporte de cerca de cinco millones de personas diariamente debe estar de la mano con el funcionamiento óptimo de todo el sistema y la eficacia en los procesos y toma de decisiones de los actores involucrados. "...las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, las cuales permiten salvar las barreras del tiempo y del espacio a la vez que generan nuevas formas de socialización de los investigadores, dinámicas de publicación y posibilidades de acceso a la información"<sup>14</sup>.

En el centro de la ciudad de Sao Paulo se encuentra en Centro de Control Operacional –CCO-, punto en el que convergen hombres y computadoras de la más alta tecnología supervisando y controlando toda la unidad del sistema; siendo así como se vigila que el intervalo entre trenes sea el indicado y el rendimiento que estos arrojan se encuentre entre los márgenes de factibilidad previstos, de la misma manera se observan y controlan todas las estaciones, los equipos de red y la energía del sistema.

En la sala de control operacional se encuentran unos paneles electrónicos que permiten a los funcionarios del Centro de Control observar cada sección de todas las estaciones del metro para así garantizar que todo esté en orden o realizar los ajustes adecuados que la situación requiera.

Los operarios de las estaciones, las cabinas de los trenes y las torres de control de los estacionamientos cuentan con un sistema de radio y teléfono que permite ponerse en contacto con el Centro de Control e informar algún imprevisto o suceso que pueda alterar la total normalidad de la operación.

Los patios de Jabalpur, Itaquera, Tamanduateí y Capao Redondo donde se sitúan los trenes al terminar el servicio, empiezan su función desde las torres donde se determina que equipamiento está listo para el despacho de acuerdo a una escala de horarios predeterminada, dando la orden de inicio de la operación en la madrugada, tiempo antes de abrir la entrada al público a las 4:00 am.

Otros modos como el semiautomático y el manual también se usan para el manejo del sistema. En el semiautomático, hay un operador que es quien controla las paradas, controla apertura y cierre de las puertas, así como la aceleración y frenado también del automotor están a cargo de esta persona.

Hay equipos que controlan la velocidad y la distancia mínima que se debe mantener entre trenes con el fin de evitar colisiones y si se llega a exceder el límite de velocidad establecido, hay un controlador automático que activa el modo de frenado

---

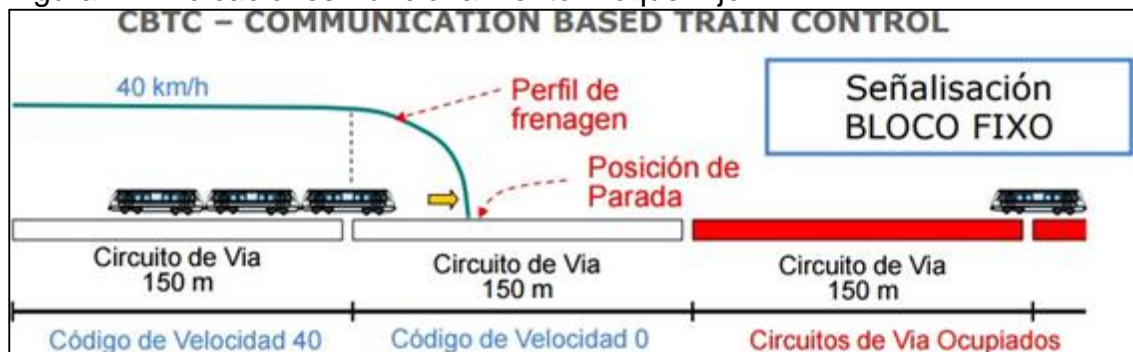
<sup>14</sup> LÓPEZ, María Paz y TABORGA, Ana María. Dimensiones internacionales de la ciencia y la tecnología en América Latina. En: Revista Latinoamérica. Enero – marzo, 2013. no.1, p. 28



inmediatamente. Antes de poner en marcha un vehículo semiautomático se realizan unas pruebas de fallo que garantizan de una manera más estricta las óptimas condiciones de funcionamiento de este, asegurando las más altas posibilidades de evitar alguna falla.

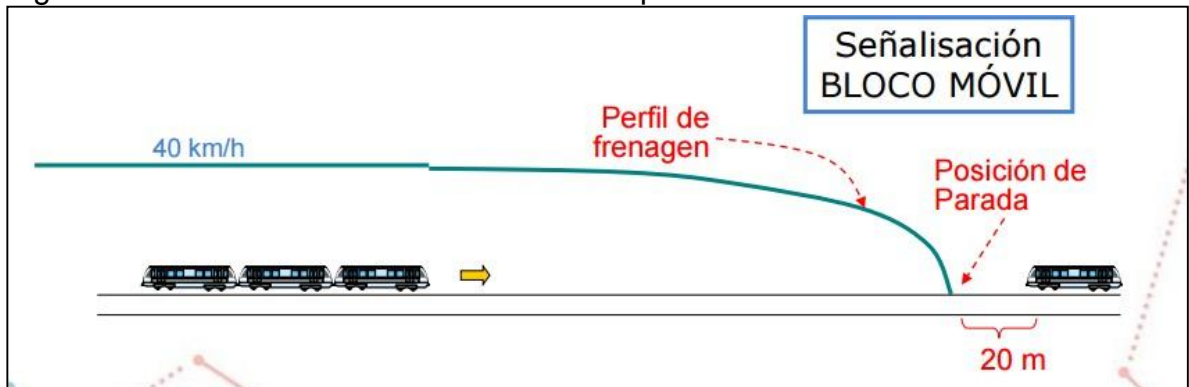
El modo de funcionamiento manual se usa para casos de emergencia en los que el operador recibe direccionamiento por parte del Centro de Control y debe mantenerse a una velocidad máxima de 30 Km/h (véase las Figuras 11 y 12).

Figura 11. Indicaciones Funcionamiento Bloque Fijo



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

Figura 12. Indicaciones Funcionamiento Bloque Móvil



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

### 3.9 METODOLOGÍA

El progreso en una ciudad conlleva al desarrollo de los demás ámbitos que afectan positiva o negativamente a sus habitantes, entre estos el tráfico es uno de los aspectos más influyentes en la calidad de vida de las personas, dado por la creciente demanda de vehículos particulares y el detrimento del transporte público. Es por esto que un nuevo modelo de transporte urbano contribuye a una mayor

accesibilidad de los sectores comerciales e industriales y el hecho de abarcar gradualmente mayores distancias.

El Metro de Sao Paulo fue implementado con la premisa de ser un sistema de transporte con tecnología de punta, ofreciendo comodidad, seguridad y los más altos estándares de calidad que brinden al usuario la percepción de obtener una ventaja costo/beneficio que impulse al sistema urbano a ser mayormente aceptado y logre competir frente al mercado del transporte particular.

Tener la proposición de mantener estos altos estándares, exige mantener todas las áreas en condiciones óptimas para el servicio, desde la capacitación permanente del personal, implementación de tecnología de vanguardia y un constante estudio del mercado para satisfacer las necesidades del público.

La meta principal es la automatización de todas las operaciones, implementando las últimas técnicas de automatización, equipos de microprocesamiento y la investigación de sistemas de transporte pesado rápido de pasajeros.

La tendencia impulsada por el Metro de Sao Paulo hacia el desarrollo tecnológico, lo ha mantenido como gestor de procesos y métodos innovadores, destacándolo como uno de los mejores referentes del transporte público a nivel mundial.

### **3.10 MANTENIMIENTO**

El excelente desempeño del Metro de Sao Paulo se debe en gran parte a una estricta política de mantenimiento centrado principalmente en actividades preventivas. Desde el establecimiento de la compañía, el modelo elegido para el mantenimiento de la aeronave fue para garantizar la máxima fiabilidad y seguridad al nuevo sistema de transporte.

Gracias a los procedimientos de mantenimiento preventivo rigurosos desarrollado y perfeccionado durante los treinta años de funcionamiento, Metro asegura la continuidad y la fiabilidad del servicio, asegurando la disponibilidad de equipos, de acuerdo a las características singulares del proyecto en plenas condiciones de funcionamiento seguras y fiables.

Se adecuó cada estación con dispositivos mecánicos, electrónicos y electromecánicos, algunos visibles a las personas y otros de mayor complejidad ubicados en pistas de túnel, patios y estaciones para un permanente monitoreo, por medio de dispositivos individuales o integrados de control que proporcionan no solo la comodidad, velocidad y seguridad al usuario, sino también la facilidad de manejo y el control del funcionamiento del sistema para los empleados que hacen parte de la organización.

Como parte de este interés por mantener la vanguardia tecnológica, todas las

estaciones están dotadas de escaleras eléctricas para su ingreso y a través de sus recorridos y de ascensores para personas discapacitadas, además de contar con luz día que brinda bastante comodidad a los usuarios dentro de las estaciones y en caso de presentarse una eventualidad, el sistema de sonido o voz es el implementado para mantener a los usuarios informados de las anomalías.

Al interior de cada estación se cuenta con una sala en donde los operadores, por medio de los paneles de video, están encargados del monitoreo de las cámaras que se encuentran ubicadas en distintos puntos de la estación, para la supervisión del sistema local y estar alerta ante cualquier suceso que ponga en riesgo el correcto y óptimo funcionamiento tanto local como integral del sistema.

Esta función de vigilancia se lleva a un plano más global, desde donde el personal operativo de esta área controla, supervisa y se mantiene al tanto del panorama de todo el sistema del metro. El Centro de Control Operativo es este punto centralizado desde donde se pretende mantener el orden de cada central particular para contribuir a la eficiencia de todo el sistema en conjunto.

Entre teléfonos, cables de transmisión, equipos de ventilación en el sistema de túneles, sistema de alimentación de energía para movimiento de los trenes y el sistema de señalización, son los más destacados implementos que llevan al sistema metro de Sao Paulo a ocupar el tercer lugar a nivel mundial, siendo de los sistemas con menos retrasos presentados llegando a ser uno de los más eficientes del mundo.

### **3.11 CONSTRUCCIÓN**

El diseño del metro tiene en cuenta los todos los aspectos requeridos para su correcto funcionamiento, así como también aspectos incluyentes como la preservación del medio ambiente, del patrimonio histórico y el uso adecuado de los suelos.

Las características geológicas, topográficas y geotécnicas, condicionan la adecuada implementación del sistema, lo que lleva a tener en cuenta el tren de aterrizaje, las características de las carreteras y los aspectos legales para su desarrollo, principalmente en las áreas cercanas a los patios y a las estaciones donde se integra con otros sistemas de transporte, alterando el entorno urbano.

La longitud que tiene una línea de metro basta para cubrir una amplia línea de terreno, siendo alrededor de 25 kilómetros en los que se van a encontrar diferentes características tanto físicas como de densidad poblacional. Esto lleva a implementar varios tipos de construcción acordes a la adecuación que estas características así requieran, alternando entre una construcción elevada o una subterránea, teniendo en cuenta las alternativas disponibles y los costos de implementación. Para el caso del metro de Sao Paulo, la construcción subterránea implica el 50% de la inversión,

por lo que se busca una reducción de costos por medio de la implementación de tecnología avanzada para optimizar el desarrollo del proyecto.

**3.11.1 El metro de superficie.** El transporte en la superficie es el tradicionalmente usado para movilización de personas o carga, que se adecúa a la zona tomando espacios de baja incursión urbana, terrenos desocupados en los que se da un consentimiento legal para su construcción o vías principales de gran tamaño que permiten la adecuación de estas estructuras. Estas estructuras de superficie suponen altos costos debido a las expropiaciones que se deben realizar, sobretodo en terrenos cercanos a las estaciones o que su cercanía se vea afectada por la nueva implementación (véase la Figura 13).

Figura 13. Metro de superficie



Fuente. El Autor.

A lo largo de las estaciones, pasillos y viaductos se construye un muro que va a lo largo de la línea por razones de seguridad para los usuarios, pero también esto impide el desarrollo urbano adecuado en sus cercanías debido a la altura de estos y la visión que da a la zona.

“El área prevista para la implementación de esta estructura superficial recibe otros impactos durante su construcción como los altos volúmenes de ruido, la congestión vial derivada de cerramientos de las autopistas, las vibraciones, la contaminación del aire e interferencia de servicios públicos, así como también el sector comercial se puede afectar debido a la disminución de movimiento en la zona”<sup>15</sup>.

En Sao Paulo las vías superficiales del metro se hacen en lastre, sobre estribos de madera o de hormigón pretensado y la ejecución de este tipo de estructuras tiene en cuenta los aspectos topográficos, geotécnicos y geológicos para determinar el grado de dificultad y los tiempos de realización de la obra.

---

<sup>15</sup> SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS. Planos y proyectos de la Secretaria de Transportes Metropolitanos –STM- [en línea]. Sao Paulo: Governo Do Estado De Sao Paulo [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.stm.sp.gov.br/index.php/planos-e-projetos/atualiza-cao-da-rede-metropolitana-de-alta-e-media-capacidade>>

**3.11.2 El metro elevado.** Al igual que en la estructura de superficie, la elevación de los tramos estructurales tiene un gran impacto en el paisaje urbano, para lo que se debe tener en cuenta ciertas características con el fin de disminuir estos efectos para la ciudad y la sociedad. Las particularidades más importantes a tener en cuenta son en primer lugar, la elección de los métodos de construcción que disminuyan los tiempos de ejecución del proyecto; segundo, optar por un tren de aterrizaje que ofrece la fabricación de trenes más pequeños y como tal más silenciosos; y por último, un mantenimiento permanente en la vía para prevenir la propagación de ruido y vibraciones (véase la Figura 14)

Figura 14. Vía Superficial del Metro



Fuente. El Autor.

Las afectaciones que se pueden tener por las condiciones topográficas son más notorias en un tipo de construcción elevado, donde también las rampas y los radios de curvatura dependen en gran medida de las características que topográficamente tiene el sector, lo que hace que una construcción elevada solo sea posible en ciertas zonas donde las limitaciones del terreno lo permitan (véase la Figura 15).

Figura 15. Metro Elevado en Sao Paulo



Fuente. El Autor.

Para estas estructuras se manejan tres tipos de material, el metal, el hormigón *in situ* y el hormigón prefabricado; siendo este último el que presenta más desventajas frente a los otros por la dificultad en el transporte de las piezas al momento de la construcción, se necesitan grandes áreas para su instalación y al momento del funcionamiento los altos niveles de ruido que se propagan afectan en gran medida a la comunidad de las inmediaciones (véase la Figura 16).

Figura 16. Metro Elevado en Sao Paulo



Fuente. El Autor

**3.11.3 Metro subterráneo.** Este tipo de construcción para el metro es el más adecuado para zonas de alta densidad poblacional, que también resulta adecuado para proporcionar un menor impacto a la superficie, disminuye la cantidad de expropiaciones, facilita el manejo de intersecciones subterráneas, reduciendo el tráfico y evita la afectación de las construcciones de la ciudad, contribuyendo también a la conservación del patrimonio histórico de la ciudad (véase la Figura 17).

Figura 17. Metro Subterráneo de Sao Paulo



Fuente. El Autor

El procedimiento que se lleva a cabo para el metro subterráneo comienza con unos muros de contención que se edifican desde la superficie, y luego se debe despejar el tráfico de la zona para cimentar la losa del techo que luego permite reforzar las

paredes laterales internamente. Este proceso permite concluir con la excavación por etapas y la ejecución de losas intermedias hasta concluir el tramo deseado.

Para el metro subterráneo de Sao Paulo, se aplicaron tres métodos de construcción:

**3.11.3.1 Zanjas o VCA.** Este método se utiliza cuando hay gran interferencia con la superficie y consiste en formar trincheras donde las condiciones geológicas y geotécnicas de una misma zona tienen variaciones a lo largo del tramo. El recubrimiento es bajo, por lo general de hasta 20 metros de profundidad y se aplica en zonas donde hay poca interferencia con las vías o donde el desvío del tráfico no cause grandes afectaciones a la movilidad.

Para zanjas grandes, se construyen paredes de contención ancladas, se realiza la excavación al nivel de profundidad requerido, se construye las estructuras permanentes como columnas, losas y muros y finalmente se realiza el relleno.

“El VCA fue el método más utilizado para la construcción de la Línea 1-Azul, aplicado de manera continua en el tramo comprendido entre las estaciones de Jabalpur y Libertad. En la Línea 2-Verde, se implementó desde la estación Avenida 23 de Mayo a la estación Heitor Penteado”<sup>16</sup>.

**3.11.3.2 Túneles Mineros NATM.** Este método es utilizado para la construcción de túneles o estaciones subterráneas de grandes dimensiones, teniendo como ventaja que al momento de la construcción se pueden hacer modificaciones en cualquier punto de acuerdo a la geometría y parcialidad de las necesidades en la excavación, como porciones de tierra que la dificulten o se encuentren bajo una fuerte presión hidrostática.

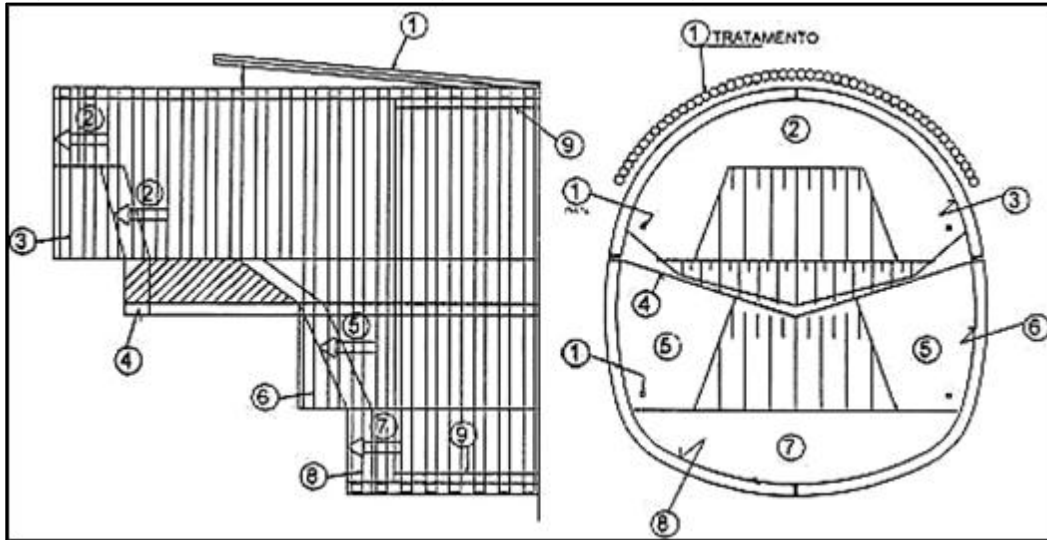
Hay casos donde se aplican otras medidas de implementación de este método, como la disminución del nivel freático o la aplicación de un revestimiento previo con inyecciones químicas o cemento.

Se utiliza hormigón prefabricado combinado con ejes de metal y fibras de hormigón por su alta resistencia, materiales que impiden la deformación del terreno, se adaptan al contorno excavado y evitan la alteración de la superficie (véase la Figura 18).

---

<sup>16</sup> SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS. Planos y proyectos de la Secretaria de Transportes Metropolitanos –STM- [en línea]. Sao Paulo: Governo Do Estado De Sao Paulo [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.stm.sp.gov.br/index.php/planos-e-projetos/atualiza-cao-da-rede-metropolitana-de-alta-e-media-capacidade>>

Figura 18. Incorporación de Cigüeñal con Hormigón Prefabricado



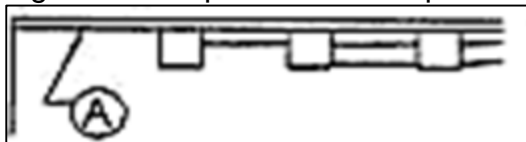
Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

Se muestra en la imagen una implementación típica del método NATM para la construcción de una línea de metro subterráneo. Los pasos que se tienen en cuenta para esta construcción son, de acuerdo a la imagen:

- Ejecutar tratamientos de DHPs.
- Avanzar excavación de media sesión.
- Instalación de cigüeñal y aplicación de hormigón prefabricado en media sesión.
- Construcción de arco invertido provisional.
- Excavación de cavidad en nichos laterales.
- Instalar el cigüeñal y aplicar hormigón prefabricado en la cavidad.
- Excavar el arco invertido definitivo.
- Realizar revestimiento final.

La incorporación del cigüeñal y el hormigón prefabricado se hace de la siguiente manera (véase la Figura 19).

Figura 19. Etapa 1 de la Incorporación del Cigüeñal

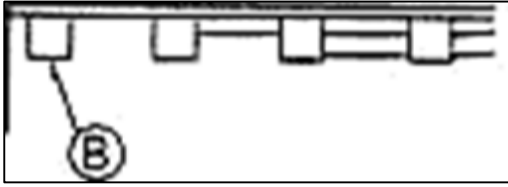


Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

- En esta primera parte se aplica una capa de hormigón prefabricado a la superficie excavada (véase la Figura 20)



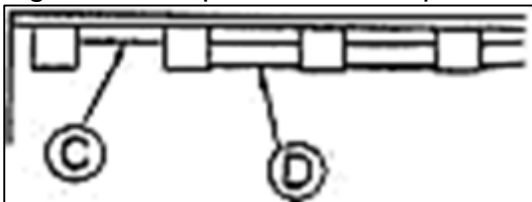
Figura 20. Etapa 2 de la Incorporación del Cigüeñal



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

➤ Se incorpora el cigüeñal (véase la Figura 21)

Figura 21. Etapa 3 de la Incorporación del Cigüeñal



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

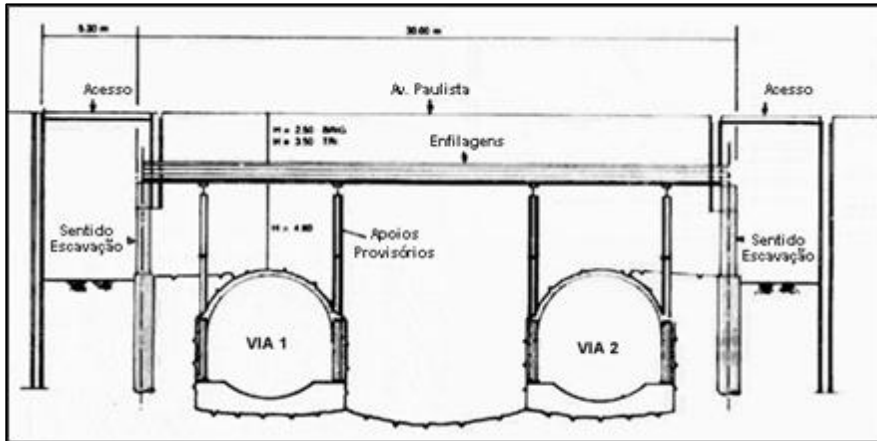
➤ Se aplica una segunda capa de hormigón prefabricado.

➤ Se completa la segunda aplicación del hormigón prefabricado del paso anterior. Los tipos de acondicionamiento del terreno más comunes son:

- ✓ Columnas horizontales o verticales en cemento
- ✓ Inyección de cemento a través de tubos (forepoling tubular)
- ✓ Forepoling cableado (Tubos metálicos)
- ✓ Inyección de productos químicos
- ✓ Punción (fibra de vidrio, varillas de acero)
- ✓ Drenaje (Ejes, casquillos, desagües)
- ✓ Forepoling por microtúneles

En un caso como es el de la estación Av. Sao Paulo, cuando la excavación no es tan profunda, alrededor de uno a cuatro metros debajo de la superficie, o en áreas donde es alto el tráfico, este método no es recomendable debido a la baja cobertura del suelo, y de utilizarse se deben implementar otros métodos auxiliares y la opción más viable es la implementación del forepoling horizontal, en el que hay una mínima interferencia con la superficie. Esta es una técnica mixta entre el NATM y la excavación inversa (véase la Figura 22).

Figura 22. Sesión Típica de las Estaciones de Brigadeiro y Trianon-MASP, Utilizando Método Mixto



Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

## **4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA METRO EN BOGOTÁ (COLOMBIA)**

### **4.1 LA EMPRESA METRO DE BOGOTÁ**

#### **4.1.1 Descripción de la empresa.**

En mayo del 2016 se autorizó al alcalde de Bogotá para la creación de la empresa METRO DE BOGOTÁ S.A., siendo una sociedad por acciones en la que participaran únicamente entidades públicas. La empresa Metro de Bogotá estará vinculada a la Secretaría Distrital de Movilidad y tendrá división de las áreas jurídica, administrativa, financiera y presupuestal con patrimonio propio y bajo el régimen de las empresas comerciales e industriales del Estado.

La Empresa Metro de Bogotá S.A. estará encargada de la planeación, construcción, estructuración y mantenimiento de las líneas que harán parte del sistema metro que se implementará en la ciudad, así como también de la adquisición, explotación y mantenimiento de la maquinaria rodante<sup>17</sup>.

Se busca la integración de la movilidad con los demás sectores partícipes en la ciudad, con lo cual la empresa Metro de Bogotá S.A. trabajará de manera integrada con organizaciones como la Empresa de Renovación Urbana, la Secretaría de Ambiente, el Instituto de Recreación y Deporte entre otros, lo que articulará el sistema de transporte con las otras áreas de interés cultural y recreacional vinculándose al mismo tiempo con la comunidad y su desarrollo integral. Del mismo modo se integrará con las empresas prestadoras de servicios públicos o privados, con el fin de garantizar el desarrollo eficiente del proyecto al mismo tiempo que asegura la calidad de vida de las personas.

Se define la duración de la empresa para 100 años y se establece que la financiación es por parte del distrito y por parte del Estado, con una primera inversión por un valor de cuatro billones ciento treinta y siete mil millones de pesos, los cuales están destinados a la realización de la primera línea del metro.

La empresa Metro de Bogotá, se integrará a los demás sistemas de movilidad ya existentes en la ciudad, con los cuales este grupo quedará conformado por La Empresa de Transporte del Tercer Milenio – Transmilenio, entidad pública; Empresa Metro de Bogotá S.A., entidad pública y la Terminal de Transporte de Bogotá, sociedad de economía mixta.

---

<sup>17</sup> ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Nace la Empresa Metro de Bogotá [en línea]. Bogotá: La Alcaldía [citado 25 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bogota.gov.co/content/temas-de-ciudad/movilidad/nace-la-empresa-metro-de-bogota>>

## 4.2 CONDICIONES GEOTÉCNICAS EN BOGOTÁ

La primera línea del metro de Bogotá que es objeto de este estudio contará con un tramo de 27 kilómetros, estando ubicado el Patio Taller en la localidad de Bosa, continuando hasta la Estación Portal Américas en un recorrido de cuatro kilómetros, seguirá por la Avenida Primera de Mayo hasta la Avenida NQS, tomando este camino hasta la estación Hortúa. De este punto se dirigirá hasta el Tercer Milenio, tomará luego la Carrera 10 y la Carrera 13 hasta Lourdes, la Carrera 11 hasta la Calle 100 y finalmente tomará la Carrera 9 hasta llegar al Patio taller de finalización del recorrido ubicado en la Calle 127.

A lo largo de este trazado definido se realizaron estudios por alrededor de 15 meses para garantizar la viabilidad del proyecto a través de este recorrido. Con más de 560 perforaciones a una profundidad de 50 metros, se consolidaron los estudios geotécnicos y geológicos de los suelos de la ciudad con los que se determina el tipo de construcción a llevar a cabo y el tipo de implementación del sistema en los diferentes tramos que hacen parte de esta primera línea de metro.

Como se puede observar en los Anexos F, G y H la información entregada muestra que cada tramo presenta unas características de terreno que permiten determinar el tipo de construcción y los métodos que son la mejor opción para infraestructura, funcionalidad y eficiencia del sistema.

Debido a las condiciones del suelo de la ciudad de Bogotá, se debe prestar atención primordial a la resistencia, deformabilidad y estabilidad de las estructuras del sistema, para así contrarrestar las acciones sísmicas y las consecuencias que la infraestructura para el funcionamiento del metro puede generar sobre todo el terreno.

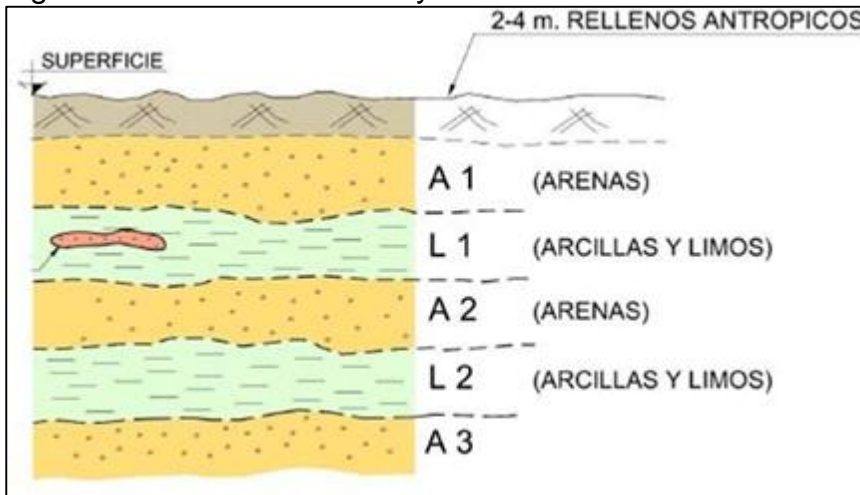
**4.2.1 Tipos de terreno.** En una descripción más detallada que arrojan los estudios que previamente se han venido realizando para la consecución del proyecto metro en Bogotá, se tiene un análisis geotécnico completo de todas las zonas de la ciudad que permitió determinar la ruta más adecuada para la construcción del metro. Estas zonas abordadas por la construcción o circundantes a esta, cuentan con las condiciones más propicias para que el sistema de transporte y la comunidad no se vean afectados a futuro por los cambios implementados por el hombre o como respuesta de la naturaleza a las alteraciones generadas en el suelo bogotano (véase la Figura 23)



de suelo sano.

**4.2.2 Problemas de diseño.** En cada sector de la línea del sistema, dividida por tramos, se encuentran características diversas que llevan a utilizar distintos métodos para su construcción. El diseño se ve afectado por la variabilidad en las características del terreno de toda la ciudad y algunos de los problemas que en Bogotá se encontrarían durante la construcción o luego de la implementación de la infraestructura, son los siguientes (véase la Figura 24).

Figura 24. Suelo en tramos I y II.



Fuente. ALCALDÍA DE BOGOTÁ. Diseño para la primera línea del metro en el marco del sistema integrado de transporte público-SITP-para la Ciudad de Bogotá (Colombia) [en línea]. Bogotá: La Alcaldía [citado 25 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.metrodebogota.gov.co/sites/default/files/documentos/Resumen%20Ejecutivo%20Primera%20L%23U00ednea%20Metro%20de%20Bogot%23U00e1.pdf>>

Para el tramo I y II, el terreno presenta características similares debido a la cercanía de estos dos. Pueden presentarse afectaciones como:

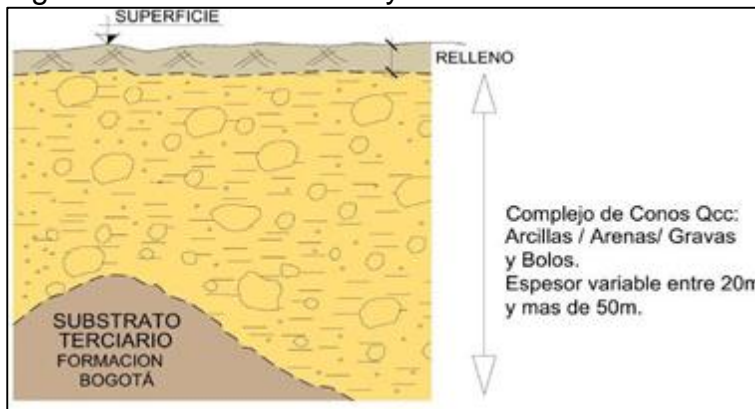
- La deformabilidad en las pantallas de la estructura;
- Dificultad al hacer las excavaciones debido al grosor de los componentes de las capas;
- Alternancia de terrenos flojos, lo que lleva a presentar cambios frecuentes de maquinaria para el diferente trato del terreno;
- Problemas de impermeabilización al fondo de los túneles;
- Afectación a infraestructura de edificios y locaciones cercanas a los puntos en

donde se dejarán tramos de línea subterráneos.

Las dificultades que se presentan en el tramo III tienen que ver no solo con terreno sino también con parte urbanística de la ciudad que podría verse afectada. Algunos de los inconvenientes que se encontrarían son:

- Poca anchura en la superficie;
- Presencia de pie de monte o complejo de conos con gran volumen de grosor;
- Se toca la zona llamada 'Formación Bogotá';
- Zona céntrica de la ciudad recién urbanizada;
- Transmilenio;
- Edificios de gran antigüedad;
- Zona con alta recepción de agua proveniente de los cerros (véase la Figura 25).

Figura 25. Suelo Tramo III y Parte del Tramo IV.



Fuente. ALCALDÍA DE BOGOTÁ. Diseño para la primera línea del metro en el marco del sistema integrado de transporte público-SITP-para la Ciudad de Bogotá (Colombia) [en línea]. Bogotá: La Alcaldía [citado 25 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.metrodebogota.gov.co/sites/default/files/documentos/Resumen%20Ejecutivo%20Primera%20L%23U00ednea%20Metro%20de%20Bogot%23U00e1.pdf>>

El tramo IV presenta semejanzas con el terreno del tramo III, donde predominan los suelos blandos y arcillosos; una amplia capa de alrededor de 40 cm protectora en la superficie y un subsuelo con alta presencia de gravas.

**4.2.3 Posibles soluciones.** El terreno en la ciudad de Bogotá presenta una gran similitud con las condiciones del terreno de la ciudad de Sao Paulo, lo que nos ayuda a cumplir el objetivo de tomar ideas ya implementadas para la realización del metro en Sao Paulo y aplicarlas en el desarrollo del proyecto para la ciudad de Bogotá.

En cuanto a las técnicas implementadas en la construcción del metro de Sao Paulo descritas en el capítulo I, es posible determinar que una aplicación similar en

sectores de Bogotá con características semejantes de terreno a los de Sao Paulo, tendrían unos resultados muy parecidos a los observados en esta ciudad, donde se supo manejar la infraestructura con diseños del sistema incluyentes con los componentes culturales, ambientales y sociales presentes en Sao Paulo.

De acuerdo a esto se puede plantear la construcción de la línea del metro en Bogotá con los mismos métodos utilizados en Sao Paulo, implementando excavaciones con tuneladora, con N.A.T.M. usando agua y por ultimo con pantallas, estas también pueden usarse para las estaciones como pantallas continuas con apuntalamiento y losas. Todo esto con el fin de hacer una mínima afectación al terreno que se busca alterar, consiguiendo unos mejores resultados a largo plazo en cuanto a conservación de material e infraestructura fija, evitar la deformabilidad en la construcción y también teniendo como fin dar un mayor soporte a las estructuras tanto subterráneas como superficiales y elevadas.



## **5. PLANTEAMIENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE LA MOVILIDAD**

### **5.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MODELO**

En esta sección se busca plantear un modelo matemático basado en la teoría de Wordrop con el cual sea posible analizar desde un punto de vista táctico la eficiencia de un sistema de transporte de flujo libre, es decir, sin demoras presentadas por congestión y donde la interferencia entre usuarios es mínima, lo que permite hacer una asignación de tráfico al sistema masivo de transporte en particular.

Los resultados obtenidos de este modelo salen de los datos ya registrados en las estadísticas históricas del sistema para el caso del metro de Sao Paulo y de supuestos para el caso del metro de Bogotá, lo que hace que no se obtengan datos exactos, sino suposiciones que pueden estar muy cerca a la realidad esperando que se presente a futuro un escenario como el planteado. Los datos aquí registrados para los supuestos del metro de Bogotá y su funcionamiento fueron sacados del análisis de las similitudes entre las dos ciudades, teniendo en cuenta la variabilidad presentada en cuanto a la densidad poblacional y dimensión territorial.

La aplicación de este modelo busca establecer un equilibrio entre el funcionamiento del sistema y la comodidad del usuario siendo adecuado para este tipo de sistema de transporte estudiado ya que al no estar presente la afectación por la congestión vial y el tráfico de la ciudad, se disminuye la complejidad del análisis debido a que no hay un alto flujo que causaría disminución de velocidad y por lo tanto una ampliación en el tiempo del trayecto.

Al emplear este modelo, se mostrará la manera óptima de usar el sistema por parte del usuario que le brindará una reducción en costos, refiriéndose este término al coste en cuanto a tiempo y comodidad del cliente. Esto obteniéndose de la máxima capacidad posible de los tramos sin saturación y teniendo en cuenta las diversas características de los tramos que componen el sistema, obligan a hacer una generalización del estado y capacidad de cada uno lo que lleva también a que los resultados estén un poco alejados de la realidad ya que asumirán unas condiciones generales a las que todo el sistema debería acogerse con el objetivo de satisfacer las mínimas condiciones permitidas en el sistema y tomando valores cercanos a la capacidad real para tomarlos como límite superior de soporte.

### **5.2 PLANTEAMIENTO DEL MODELO**

La formulación del modelo está dada por una función objetivo y tres restricciones que tienen en cuenta la demanda, el tiempo y todas las posibles rutas de los diferentes tramos que componen el sistema. Teniendo en cuenta estos tres factores se logra optimizar el sistema dando la capacidad de flujo que cada tramo conectado puede soportar como máximo posible y una generalización de la mínima capacidad

de un tramo aplicada a todo el sistema para así evitar que este colapse.

En conformación a los tres factores antes tratados, el planteamiento del modelo viene de la siguiente manera (véase las Figuras 26 y 27)

Figura 26. Función Objetivo

$$\text{Min } Z(x) = \sum_{mn} X_{mn} t_{mn} (X_{mn})$$

Fuente. El Autor

Figura 27. Restricciones

**a.**  $\sum_r f_r^{ab} = d^{ab}, \forall a, b$

**b.**  $X_{mn} = \sum_a \sum_b \sum_r f_r^{ab} \theta_{mnr}^{ab}, \forall m, n \in C$

**c.**  $f_r^{ab} \geq 0, \forall r, a, b$

Fuente. El Autor

Donde:

➤ m = Intersecciones (Estaciones)

➤ mn = Tramos de vía que conectan las estaciones (C)

➤ a,b = Punto origen –a– y Punto destino –b–

➤ r = Rutas definidas entre a y b

➤ C = Conjunto de tramos de vía

➤ t<sub>mn</sub> = Tiempo de viaje en el tramo mn

➤ d<sup>ab</sup> = Demanda de viajes desde a ó hacia b

➤  $\theta_{mnr}^{ab} = 1$  Si el tramo mn es parte de la ruta r que conecta ab, sino 0.

➤ t<sub>mn</sub>(X<sub>mn</sub>) = Tiempo de viaje en tramo mn como función del flujo de viajes sobre mn

➤ X<sub>mn</sub> = Flujo en el tramo mn : Cantidad de viajes en mn

➤ f<sub>r</sub><sup>ab</sup> = Flujo en r de ab : Cantidad de viajes que usan r para ir de a a b

Como se observa, se tienen en cuenta como factor principal de influencia en el funcionamiento del sistema, la demanda y la capacidad de respuesta por parte del sistema a esta cantidad determinada de personas y el crecimiento poblacional que se tiene como factor presente en el modelo.

Debido a esto se manejan para este modelo los siguientes parámetros:

- El modelo hace parte de un supuesto basado en un solo periodo de tiempo, aplicable desde este punto a otros periodos de tiempo que se deseen estudiar.
- La red del Metro no incluye efectos de congestión.
- No se tienen en cuenta tiempos de acceso a las estaciones ni los tiempos de espera para acceder al vehículo, ya que se plantea como un dato constante incluido en los tiempos de las rutas.

### **5.3 DESARROLLO DEL MODELO**

Se planteó la aplicación del modelo por medio del uso del software GAMS con el cual se evaluarán todas las variables incluidas en el prototipo y el cual arroja datos que permiten analizar la optimización del sistema por medio de la minimización del esfuerzo de este, visto desde el punto de vista de la capacidad soportada con el fin de mantener un flujo constante y sin saturaciones en el sistema.

**5.3.1 Desarrollo del Modelo aplicado al Metro de Sao Paulo.** Se logró la recolección de la información necesaria para poder incluir los datos reales a la aplicación del modelo y así obtener unos resultados lo más cercanos posibles a la situación real del sistema, teniendo en cuenta lo aclarado anteriormente, que la generalización de cierta información de los tramos de menor capacidad adaptados a los tramos de mayor capacidad, alejan de cierto modo una visión más precisa de la realidad que se busca plantear, pero también acierta en dar un planteamiento base del que se puede partir para ajustar los límites de capacidad de cada componente del sistema.

A continuación se presentan los datos obtenidos del Centro de Operaciones del Metro de Sao Paulo, utilizados para la realización de este modelo (véase los Cuadros 4, 5, 6, 7, y 8).

Cuadro 4. Datos de Variables para Línea 1-Azul Metro de Sao Paulo.

<b>LÍNEA 1-AZUL</b>	
<b>m=</b>	23
<b>mn=</b>	3
<b>a,b=</b>	a= Tucurubi ; b= Jabaquara
<b>r=</b>	529
<b>C=</b>	3
<b>tmn=</b>	1) 14,81 ; 2) 9,87 ; 3) 11,52
<b>dab=</b>	1142
<b>θabmnr=</b>	1
<b>tmn(Xmn)=</b>	37,86

Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

Cuadro 5. Datos de Variables para Línea 2-Verde Metro de Sao Paulo

<b>LÍNEA 2-VERDE</b>	
<b>m=</b>	14
<b>mn=</b>	3
<b>a,b=</b>	a= Villa Prudente ; b= Villa Madalena
<b>r=</b>	196
<b>C=</b>	3
<b>tmn=</b>	1) 5,72 ; 2) 5,72 ; 3) 13,35
<b>dab=</b>	573
<b>θabmnr=</b>	1
<b>tmn(Xmn)=</b>	26,7

Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

Cuadro 6. Datos de Variables para Línea 3-Roja Metro de Sao Paulo

<b>LÍNEA 3-ROJA</b>	
<b>m=</b>	18
<b>mn=</b>	4
<b>a,b=</b>	a= Corinthians ; b= Palmeiras- Barra Fundo
<b>r=</b>	324
<b>C=</b>	4
<b>tmn=</b>	1) 3,66 ; 2) 7,33 ; 3) 9,16 ; 4) 5,47
<b>dab=</b>	1288
<b>θabmnr=</b>	1
<b>tmn(Xmn)=</b>	33

Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

Cuadro 7. Datos de Variables para Línea 5-Purpura Metro de Sao Paulo

LÍNEA 5-PURPURA	
m=	7
mn=	3
a,b=	a= Capao Redondo ; b= Adoolfo Pinheiro
r=	49
C=	3
tmn=	1) 4,18 ; 2) 6,27 ; 3) 4,18
dab=	292
θabmnr=	1
tmn(Xmn) =	14,64

Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

Cuadro 8. Datos de Variables para Línea 15-Plata Metro de Sao Paulo

LÍNEA 15-PLATA	
m=	2
mn=	1
a,b=	a= Oratorio ; b= Vila Prudente
r=	2
C=	1
tmn=	2,64
dab=	158
θabmnr=	1
tmn(Xmn) =	2,64

Fuente. METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

**5.3.1.1 Aplicación del modelo.** Los datos anteriormente mostrados fueron usados para la programación del modelo en el programa GAMS como se muestra a continuación, esto con el fin de indicar la forma correcta de realizar la aplicación en el programa, tanto de datos actualizados a este esquema de metro de Sao Paulo, como también a un tipo de sistema de transporte de similares características.

El ingreso de los datos al programa GAMS queda de la siguiente manera:

En la primera parte de indica el título y de determinan las variables con las que se va a trabajar:

\$Title Modelo matemático de asignación de trafico SETS

m intersecciones estaciones origen/m1\*m5/

n intersecciones estaciones destinos /n1\*n5/ a Punto de origen /a1\*a5/

b Punto destino /b1\*b5/  
 r rutas definidas entre a y b /r1\*r5/;

Parameters

Teta(m,n) 1 si el tramo mn hace parte de la ruta r P(a) puntos de origen  
 /a1 1  
 a2 1  
 a3 1  
 a4 1 a5 1/  
 PP(b) puntos destinos  
 /b1 1  
 b2 1  
 b3 1  
 b4 1 b5 1/  
 RR(r) rutas definidas  
 / r1 529  
 r2 196  
 r3 324  
 r4 49  
 r5 2/ ;

Se fijan los parámetros a los que se les debe asignar valor. Para este caso del metro de Sao Paulo, por estar estudiando las cinco líneas que componen el sistema metro, se toma cada punto de origen y cada punto de destino con el valor de 1 por ser las líneas independientes cada una de la otra (véase el Cuadro 9)

Cuadro 9. Tabla d (a,b) Demanda de Viaje Desde a o Hacia b

<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>b3</b>	<b>b4</b>	<b>b5</b>
a1	1142	750	750	750
a2	300	573	300	300
a3	800	800	1288	800
a4	150	150	150	292
a5	110	110	110	158;

Fuente. El Autor

En este Cuadro se debe indicar la demanda de pasajeros de tramo a tramo, con lo que según la información obtenida de las bases del Centro de Control Operacional del Metro de Sao Paulo, la demanda de cada línea de metro está indicada en cada intersección de la tabla así: a1b1: Línea 1-Azul; a2b2: Línea 2-Verde; a3b3: Línea 3-Roja; a4b4: Línea 5-Purpura; a5b5: Línea 15-Plata.

Para las demás intersecciones se asumió un valor cercano a la posible demanda de pasajeros, así al tomar un mismo valor puede compensar la demanda entre tramos que deba ser mayor o menor a la aquí planteada (véase el Cuadro 10).

Cuadro 10. Table t (m,n) Tiempo de Viaje en el Tramo mn (mins)

	n1	n2	n3	n4	n5
m 1	38	40	41	28	43
m 2	40	27	35	42	17
m 3	41	35	33	44	58
m 4	28	42	44	15	49
m 5	43	17	58	49	3;

Fuente. El Autor

La tabla para el tiempo de viaje en los diferentes tramos, está completada con los datos obtenidos del Centro de Control Operacional en las intersecciones que indican un mismo tramo ( $m_1n_1$ ;  $m_2n_2$ ;  $m_3n_3$ ;  $m_4n_4$ ;  $m_5n_5$ ); y para el resto de intersecciones se realizó un cálculo sobre el plano del metro, asumiendo un valor promedio del tiempo que se toma en recorrer un trayecto de estación a estación, tomando las estaciones necesarias para completar el recorrido en la tabla indicado.

Teta (m,n)=1;

El valor de teta se asume como 1 ya que la condición para su planteamiento es tener en cuenta si el recorrido del tramo hace parte de la ruta, y por ser un sistema cerrado se toman todos los recorridos como parte de las rutas existentes, dando así el valor a teta de 1.

Variables

Z            Valor de la función objetivo Positive variables  
 F(r,a,b)    Flujo r de ab  
 X(m,n)     Flujo en el tramo mn  
 Suma        Sumatoria

Equation cost

Ecuación de costo R1(a,b)  
 Primera restricción R2(m,n)  
 Segunda restricción S(a,b)  
 Suma;

Se asume el término 'costo' como las implicaciones que tiene el uso del sistema en cuanto a tiempo e intercambio de rutas para recorrer un trayecto, mas no –en este caso- de un término monetario.

```

cost..Z =E= Sum((m,n),X(m,n)*t(m,n));
R1(a,b)..Sum(r,F(r,a,b))=E= d(a,b);
S(a,b)..Suma =E= Sum(r,F(r,a,b));
R2(m,n)..X(m,n)=E= Sum(a,P(a))*Sum(b,PP(b))*Suma*Teta(m,n); model trafico
/all/;
Solve Trafico Using NLP minimizing Z; display F.L,X.L,Z.L;

```

**5.3.1.2 Resultados obtenidos.** Los datos arrojados por el software permiten hacer una suposición cercana al escenario real y se puede determinar la configuración y capacidad de la malla vial puesta para su análisis.

Los resultados arrojados por el sistema se presentan a continuación:

GAMS Rev 148 x86/MS Windows 11/19/16 21:58:10 Page 1 Modelo matemático de asignación de trafico

Compilation

```

2      SETS
3      m intersecciones estaciones origen /m1*m5/
4      n intersecciones estaciones destinos /n1*n5/
5      a Punto de origen /a1*a5/
6      b Punto destino /b1*b5/
7      r rutas definidas entre a y b /r1*r5/;
8      Parameters
9      Teta(m,n) 1 si el tramo mn hace parte de la ruta r
10     P(a) puntos de origen 11 /a1 1

```

GAMS Rev 148 x86/MS Windows 11/19/16 21:58:10 Page 2 Modelo matemático de asignación de trafico

Equation Listing SOLVE trafico Using NLP From line 60

GAMS Rev 148 x86/MS Windows 11/19/16 21:58:10 Page 4 Modelo matemático de asignación de trafico (véase el Cuadro 11)

Cuadro 11. Model Statistics SOLVE tráfico Using NLP From line 60

<b>MODEL STATISTICS</b>			
BLOCKS OF EQUATIONS	4	SINGLE EQUATIONS	76
BLOCKS OF VARIABLES	4	SINGLE VARIABLES	152
NON ZERO ELEMENTS	351	NON LINEAR N-Z	0
DERIVATIVE POOL	6	CONSTANT POOL	16
CODE LENGTH	1		

Fuente. El Autor



GENERATION TIME = 0.062 SECONDS 4 Mb WIN225-148 May 29, 2007

EXECUTION TIME = 0.062 SECONDS 4 Mb WIN225-148 May 29, 2007

Solution Report SOLVE trafico Using NLP From line 60

S O L V E S U M M A R Y

MODE trafico OBJECTIVE Z  
L  
TYPE NLP DIRECTION  
MINIMIZE  
SOLV CONOPT FROM LINE 60  
ER

\*\*\*\* SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION  
\*\*\*\* MODEL STATUS 4 INFEASIBLE  
\*\*\*\* OBJECTIVE VALUE 2502500.0000

RESOURCE USAGE, 0.039 1000.00  
LIMIT 0  
ITERATION COUNT, 4 10000  
LIMIT  
EVALUATION 0 0  
ERRORS

C O N O P T 3 x86/MS Windows version 3.14R-017-061 Copyright (C) ARKI  
Consulting and Development A/S  
Bagsvaerdvej 246 A

DK-2880 Bagsvaerd, Denmark Using default options.  
\*\* Infeasible solution. There are no superbasic variables.

CONOPT time Total 0.022 seconds of which: Function evaluations  
0.000 = 0.0%  
1st Derivative evaluations 0.000 = 0.0%

Workspace = 0.76 Mbytes Estimate = 0.76 Mbytes Max used  
= 0.12 Mbytes

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- EQU cost . . . EPS

cost ecuacion de costo

---- EQU R1 primera restricción (véase el Cuadro 12).

Cuadro 12. Resultados Primera Restricción

	LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL
a1.b1	1142.000	110.000	1142.000	9.7656E-4 INFES
a1.b2	750.000	110.000	750.000	0.002 INFES
a1.b3	750.000	110.000	750.000	0.002 INFES
a1.b4	750.000	110.000	750.000	0.002 INFES
a1.b5	750.000	110.000	750.000	0.002 INFES
a2.b1	300.000	110.000	300.000	0.004 INFES
a2.b2	573.000	110.000	573.000	0.002 INFES
a2.b3	300.000	110.000	300.000	0.004 INFES
a2.b4	300.000	110.000	300.000	0.004 INFES
a2.b5	300.000	110.000	300.000	0.004 INFES
a3.b1	800.000	110.000	800.000	0.002 INFES
a3.b2	800.000	110.000	800.000	0.002 INFES
a3.b3	1288.000	110.000	1288.000	9.7656E-4 INFES
a3.b4	800.000	110.000	800.000	0.002 INFES
a3.b5	800.000	110.000	800.000	0.002 INFES
a4.b1	150.000	110.000	150.000	0.008 INFES
a4.b2	150.000	110.000	150.000	0.008 INFES
a4.b3	150.000	110.000	150.000	0.008 INFES
a4.b4	292.000	110.000	292.000	0.004 INFES
a4.b5	150.000	110.000	150.000	0.008 INFES
a5.b1	110.000	110.000	110.000	-0.078
a5.b2	110.000	110.000	110.000	.
a5.b3	110.000	110.000	110.000	.
a5.b4	110.000	110.000	110.000	.
a5.b5	158.000	110.000	158.000	0.008 INFES

Fuente. El Autor

---- EQU S suma

LOWER	LEVEL	UPPER	MARGINAL	a1.b1
	9.7656E-4			.
a1.b2	.	.	0.002	.
a1.b3	.	.	0.002	.
a1.b4	.	.	0.002	.
a1.b5	.	.	0.002	.
a2.b1	.	.	0.004	.
a2.b2	.	.	0.002	.
a2.b3	.	.	0.004	.
a2.b4	.	.	0.004	.

---- VAR Z -INF 2.5025E+6 +INF .

EXECUTION TIME = 0.047 SECONDS 3 Mb WIN225-148 May 29, 2007  
 USER: Petroleum Research Institute G070810:1735CP-WIN ECOPETROL,  
 Colombian Petroleum Company DC1641

\*\*\*\* FILE SUMMARY

Input C:\Users\ACER\Downloads\Trafico.gms  
 Output C:\Users\ACER\Documents\gamsdir\projdir\Trafico.lst

**5.3.1.2 Análisis de los resultados.** Como se ha venido hablando desde el comienzo de este capítulo, la utilización de un medio de transporte implica un costo derivado de varias razones, entre el monetario, el costo en términos de uso del tiempo, el costo asociado a la comodidad percibida en su uso y la apreciación que se tiene de un sistema eficaz.

Para este caso, se concentró el interés en buscar la eficacia del sistema metro como un planteamiento que en su aplicación podría garantizar la mejora en el ofrecimiento del servicio, lo que haría que se amplíe su uso y logrando así descongestionar la ciudad del alto tráfico que se presenta en la actualidad.

Los datos que se lograron obtener de estadísticas cuantitativas que muestran el funcionamiento actual del sistema, permiten crear un escenario propicio para su análisis; siendo así, la fijación más importante está dada en la capacidad que cada línea del metro tiene en cuanto al funcionamiento del sistema y la demanda que logre soportar como límite superior planteado.

Los tiempos de manejo del sistema, entre los que están tiempos de espera para salida de los vehículos de patio, la espera en cada estación para embarque y desembarque de pasajeros y la velocidad que se mantiene para cumplir un trayecto, generan un tiempo total que es el que se buscó fuera modificado para la mejora del servicio. Teniendo en cuenta estos aspectos, en la parte inicial de los resultados obtenidos, se observa que es posible una mejora en el sistema con modificación del flujo manejado actualmente, es decir la cantidad de personas que logran ser transportadas en determinado tiempo, se plantea una reducción de tiempos en un rango entre 28 hasta 41, viendo esto como una mejora significativa teniendo en cuenta la totalidad del flujo que logra moverse diariamente. Es decir los tiempos que toma trasladarse en determinado tramo pueden hacer una modificación en su manejo de movimientos consiguiendo llegar a recorrer los trayectos sin sobrepasar estos límites de tiempo.

En la solución de la primera restricción arroja la demanda permitida para cada línea del metro y los recorridos permitidos entre estas o rutas de trayecto. Es decir, un mínimo permitido para el aprovechamiento del sistema y un máximo permitido para evitar la saturación de este. Observamos que el mínimo valor planteado es 110, es decir es la mínima cantidad de personas que cada estación debería recibir y con un máximo de 1100 a 1300 personas lo que compensaría el nivel de capacidad que las líneas más concurridas podrían soportar.

**5.3.2 Desarrollo del modelo aplicado al Metro de Bogotá.** El estudio preliminar del metro de Sao Paulo permitió identificar semejanzas con la ciudad de Bogotá como las condiciones demográficas, de suelo, infraestructura, problemas de movilidad, entre otros, que dan lugar a comparaciones con el fin de ser posible implementar un sistema de similares características.

Como se vio en el Capítulo II del presente trabajo, el gobierno distrital de Bogotá ha venido realizando los estudios de factibilidad para la implementación del sistema masivo de transporte Metro, información que se toma como base para la realización de este aparte. Los datos previstos para la demanda y capacidad de flujo por tramo salen de un comparativo realizado entre la población local de las dos ciudades y el nivel de concurrencia que tienen los sistemas de transporte urbano.

Teniendo en cuenta que la implementación del sistema en la ciudad hasta ahora tendrá su comienzo, solo se cuenta con una línea de metro inicialmente, por lo que el modelo aplicado se realizará tomando los cuatro tramos de la vía en los que está dividido.

Los datos para la aplicación del modelo son los siguientes (véase el Cuadro 13)

Cuadro 13. Datos de Variables para Línea 1 Metro de Bogotá

<b>LÍNEA 1-METRO</b>	
<b>m=</b>	27
<b>mn=</b>	4
<b>a,b=</b>	a= Talleres y Cocheras ; b= Calle 127
<b>r=</b>	527
<b>C=</b>	4
<b>t<sub>mn</sub>=</b>	1) 13,8 ; 2) 12 ; 3) 13,8 ; 4) 10,2
<b>d<sub>ab</sub>=</b>	1148
<b>θ<sub>ab</sub></b> <b>mnr=</b>	1
<b>t<sub>mn</sub>(X<sub>mn</sub>)=</b>	49,8

Fuente. El Autor

### 5.3.2.1 Aplicación del modelo.

\$Title Modelo matematico de asignacion de trafico SETS

m intersecciones estaciones origen / $m_1 * m_4$ / n intersecciones estaciones destinos / $n_1 * n_4$ / a Punto de origen / $a_1 * a_4$ /  
 b Punto destino / $b_1 * b_4$ /  
 r rutas definidas entre a y b / $r_1$ /;

Parameters

Teta(m,n) 1 si el tramo mn hace parte de la ruta r

P(a) puntos de origen

/ $a_1$  1

$a_2$  1

$a_3$  1  $a_4$  1/

PP(b) puntos destinos

/b1 1

b2 1

b3 1 b4 1/

RR(r) rutas definidas

/ r1 527/ ; (véase los Cuadros 14 y 15)

Cuadro 14. Table d(a,b) Demanda de Viaje Desde a o Hacia b

	<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>b3</b>	<b>b4</b>
a1	314	200	200	200
a2	180	274	180	180
a3	200	200	314	200
a4	150	150	150	246;

Fuete. El Autor

Cuadro 15. Table t(m,n) Tiempo de Viaje en el Tramo mn (mins)

	<b>n1</b>	<b>n2</b>	<b>n3</b>	<b>n4</b>
m1	14	26	40	51
m2	26	12	26	37
m3	40	26	14	25
m4	51	37	25	11;
Teta(m,n)=1;				

Fuente. El Autor

**5.3.2.2 Resultados obtenidos.** A continuación se muestran los resultados arrojados por el software, donde se puede crear un escenario planteando lo que sería la situación más cercana a lo real que se tendría en la ciudad de Bogotá, utilizando la similitud en la aplicación de los sistemas de las dos ciudades.

Los resultados obtenidos son:

GAMS Rev 148 x86/MS Windows 11/20/16 05:29:57 Page 1 Modelo matemático de asignación de trafico

Compilation

2 SETS  
3 m intersecciones estaciones origen/m1\*m4/  
4 n intersecciones estaciones destinos /n1\*n4/  
5 a Punto de origen /a1\*a4/  
6 b Punto destino /b1\*b4/  
7 r rutas definidas entre a y b /r1/;  
8 Parameters

```

9      Teta(m,n) 1 si el tramo mn hace parte de la ruta r
10     P(a) puntos de origen 11 /a1 1
12     a2 1
13     a3 1
14     a4 1/
15 PP(b) puntos destinos 16 /b1 1
17     b2 1
18     b3 1
19     b4 1/
20     RR(r) rutas definidas 21 / r1 527/ ;
22
23     Table d(a,b) demanda de viaje desde a o hacia b
24         b1 b2 b3 b4 25 a1 314 200 200 200 26 a2 180 274 180 180 27 a3
200 200 314 200 28 a4 150 150 150 246;
29     table t(m,n) tiempo de viaje en el tramo mn (mins)
30         n1 n2 n3 n4

      3 m 1 2 4 5
      1 1 4 6 0 1
      3 m 2 1 2 3
      2 2 6 2 6 7
      3 m 4 2 1 2
      3 3 0 6 4 5
      3 m 5 3 2 1
      4 4 1 7 5 1
      ;

35     Teta(m,n)=1;
36     Z Valor de la funcion objetivo
37     Positive variables
38     F(r,a,b) Flujo r de ab
39     X(m,n) Flujo en el tramo mn
40     Suma Sumatoria
41     Equation
42     cost ecuacion de costo
43     R1(a,b) primera restriccion
44     R2(m,n) segunda restriccion
45     S(a,b) suma;
47 cost..Z =E= Sum((m,n),X(m,n)*t(m,n));
48 R1(a,b)..Sum(r,F(r,a,b))=E= d(a,b);
49 S(a,b)..Suma =E= Sum(r,F(r,a,b));
50 R2(m,n)..X(m,n)=E= Sum(a,P(a))*Sum(b,PP(b))*Suma*Teta(m,n);
51     model trafico /all/;
52     Solve Trafico Using NLP minimizing Z;
53     display F.L,X.L,Z.L;

```

54  
55

COMPILATION TIME = 0.000 SECONDS 3 Mb WIN225-148 May 29, 2007  
GAMS Rev 148 x86/MS Windows 11/20/16 05:29:57 Page 4 Modelo matemático de asignación de tráfico (véase el Cuadro 16).

Cuadro 16. Model Statistics SOLVE trafico Using NLP From line 52

MODEL STATISTICS			
BLOCKS OF EQUATIONS	4	SINGLE EQUATIONS	49
BLOCKS OF VARIABLES	4	SINGLE VARIABLES	34
NON ZERO ELEMENTS	97	NON LINEAR N-Z	0
DERIVATIVE POOL	6	CONSTANT POOL	16
CODE LENGTH	1		

Fuente. El Autor

GENERATION TIME = 0.078 SECONDS 4 Mb WIN225-148 May 29, 2007  
EXECUTION TIME = 0.078 SECONDS 4 Mb WIN225-148 May 29, 2007

**5.3.2.3 Análisis de los resultados.** Teniendo ya definido el modo de operación y según la capacidad que tendría el sistema del metro en Bogotá, se puede recrear las posibilidades de éxito que generaría de acuerdo a la demanda que se tiene planteada.

Igual que para el metro de Sao Paulo, para este sistema se pueden modificar los tiempos de arranque, de espera en embarque y desembarque de pasajeros y la velocidad de los trenes con el fin de manejar un flujo más alto de actividad. Esto con el fin de implementar un sistema eficaz que ayudaría a una mejora en la movilidad de la ciudad al tiempo que brindaría mayor percepción de comodidad para los ciudadanos.

Con la primera restricción se puede definir el flujo de las rutas de cada tramo entre 200 y 314 viajes, de acuerdo a la demanda presentada, lo que mantendría un sistema que cuente con los movimientos mínimos necesarios para su funcionamiento, y así se evitaría sobrepasar la capacidad de demanda aceptada y tendiendo un límite superior de movimientos garantiza no sobrecargar la capacidad del sistema.

Se puede observar que la comunicación entre tramos o rutas alternas se pueden modificar en cuanto a tiempos, mostrando cuatro de estas que pueden presentar una mejora en tiempo de trayecto, disminuyendo en unas 74 y hasta 114 viajes de acuerdo a una optimización de los tiempos y movimientos del sistemas, pero por otro lado están unas rutas que generarían mayor ocupación del sistema para compensar algunas de las disminuciones inicialmente planteadas en este párrafo,



siendo esto algo no conveniente para la parte operativa y estratégica del metro de Bogotá, como también para los usuarios que notarían una acumulación de trabajo en la operación.

## 6. CONCLUSIONES

➤ **Desarrollo urbano por medio de mejoras estructurales.** El estudio de la información obtenida por parte del Metro de Sao Paulo permite conocer la mejora que se ha venido desarrollando en la ciudad luego de implementar sistemas de transporte modernos, que se adecuan al amplio crecimiento poblacional que viene acompañado de exigencias de progreso para el mantenimiento y constante aumento de su bienestar. Dado este crecimiento, la extensión de red viaria se ve constantemente colapsada lo que obliga a la búsqueda de otras alternativas que estimulen el desarrollo que se presenta y favorezcan tanto a la infraestructura de la ciudad como también a la comunidad, que está a la espera de recibir constantes beneficios.

Estas causas permiten ver que la implementación de un sistema de transporte urbano como el metro es una inversión que permite favorecer a futuro a una comunidad que llega a abarcar grandes extensiones poblacionales en la ciudad, generando cada vez más un colapso en movilidad por la alta frecuencia de uso de transporte tanto público como privado siendo el metro un modo de abarcar la expansión que se vive en la actualidad.

➤ **Metodología de aplicación para sistemas de transporte modernos.** La planificación para la implementación de un sistema transporte metro abarca grandes estructuras funcionales y estratégicas de una ciudad. Sao Paulo permite conocer las tácticas que se llevaron a cabo para la planeación, construcción, mantenimiento y desarrollo del metro de esta ciudad y así también es posible tomar parte de esta información para lograr aplicar ideas similares a Bogotá, debido al parecido característico que se halla entre estas dos ciudades.

Tener una base comparativa permite analizar los aciertos y errores ya presentados en otros casos y así lograr que la nueva implementación conlleve más éxito y menos pérdidas monetarias, de tiempo, daños estructurales y afectación al bienestar de la comunidad.

➤ **Planes de movilidad con implementación de mejora.** Los problemas que acarrea el desarrollo de una ciudad, buscan que la administración este en constante búsqueda de mejora para sus habitantes y en este trabajo se buscó proponer un método que genere un incremento en la calidad del servicio que se planea ofrecer en la ciudad teniendo en cuenta la capacidad a la que la implementación de este sistema se somete, observando que en Bogotá se requeriría de una mayor disposición de recursos para un desarrollo más complementario que abarque el hecho de poder plantear una idea de optimización sin necesidad de disminuir la suficiencia de otros aspectos para compensar las mejoras de uno solo.

## BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE BOGOTÁ. Diseño para la primera línea del metro en el marco del sistema integrado de transporte público-SITP-para la Ciudad de Bogotá (Colombia) [en línea]. Bogotá: La Alcaldía [citado 25 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.metrodebogota.gov.co/sites/default/files/documentos/Resumen%20Ejecutivo%20Primera%20L%23U00ednea%20Metro%20de%20Bogot%23U00e1.pdf>>

----- . Nace la Empresa Metro de Bogotá [en línea]. Bogotá: La Alcaldía [citado 25 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.bogota.gov.co/content/temas-de-ciudad/movilidad/nace-la-empresa-metro-de-bogota>>

BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA. Qué es movilidad urbana [en línea]. Madrid: El Banco [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2013/08/que-es-movilidad-urbana/>>

BENNETT, Rachel. ¿Qué es el crecimiento demográfico? [en línea]. Bogotá: Leaf Group [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: [http://www.ehowen-espanol.com/crecimiento-demografico-sobre\\_325116/](http://www.ehowen-espanol.com/crecimiento-demografico-sobre_325116/)>

CHRISTALLER, W. Die Zentralen Orte in Süddeutschland. Gustav Fischer Verlag, Jena. English translation: The central places of southern Germany. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. 230 p.

COMPANHIA PAULISTA DE TRENS METROPOLITANOS CPTM. Información básica de la CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos 2015 – 2016 [en línea]. Sao Paulo: CPTM [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.cptm.sp.gov.br/a-companhia/Pages/a-companhia.aspx>>

DEFINICIÓN DE. Definición de Eficiencia [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://conceptodefinicion.de/eficiencia/>>

----- . Definición de Transporte [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://conceptodefinicion.de/transporte/>>

ECONOLINK. Crecimiento Económico [en línea]. Buenos Aires: La Empresa [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.econlink.com.ar/economia/crecimiento/crecimiento.shtml>>

FIGUEROA SANTOS, Ingrid y CASTAÑEDA GALLEGO, Juan Eduardo. Caracterización de los criterios logísticos clave de transporte urbano de pasajeros para el barrio Belisario Caicedo de la comuna 20 en Santiago de Cali. Cali: Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería. Modalidad trabajo de Maestría en Logística Integral, 2013. 130 p.

KRAJNIK, Renato y RIZO, Rodrigo. Sistema vial y transporte público de Curitiba [en línea]. Bogotá: Slideshare [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.slideshare.net/10301632/sistema-vial-y-de-transporte-de-curitiba>>

LEÃO, Mário Lopes; O Metropolitano Em São Paulo. São Paulo: Prefeitura do Municipio de São Paulo, 1945. 85 p.

LÓPEZ, María Paz y TABORGA, Ana María. Dimensiones internacionales de la ciencia y la tecnología en América Latina. En: Revista Latinoamérica. Enero – marzo, 2013. no.1.

METRO DE SAO PAULO. Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Organigrama Infraestructura

----- . Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Coordinación Técnica

----- . Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Imagen corporativa

----- . Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. Estructura organizacional

----- . Gerencia de Operaciones [CD-ROM]. [Sao Paulo]: La Empresa, 2016. GOP / OPC / CTE

MOREIRA, Alexandre. Memoria da Engenharia: Transporte urbano, passado e futuro. Webdesigner: Engenho Editora Técnica, 2002. 350 p.

PEDRAZA MARTÍNEZ, Luis Fernando; HERNÁNDEZ SUÁREZ, César Augusto y LÓPEZ SARMIENTO, Danilo Alfonso. Sistema de comunicación TCP/IP para el control de una intersección de tráfico vehicular. En: Ingeniería Investigación y Tecnología. Octubre – diciembre, 2013. vol. 14, no. 4.

SALLES, Luciane. Brasil: Como resolver a crise na mobilidade urbana? [en línea]. Sao Paulo: Global Voices [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://pt.globalvoices.org/2013/07/28/brasil-como-resolver-a-crise-na-mobilidade-urbana/>>

SALLES, Luciane. Brasil: Como resolver a crise na mobilidade urbana? [en línea]. Sao Paulo: Global Voices [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://pt.globalvoices.org/2013/07/28/brasil-como-resolver-a-crise-na-mobilidade-urbana/>>

----- . Crisis de movilidad urbana en Brasil [en línea]. Sao Paulo: Global Voices [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.globalvoices.org/2013/08/19/crisis-de-movilidad-urbana-en-brasil/>>

SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS. Planos y proyectos de la Secretaria de Transportes Metropolitanos –STM- [en línea]. Sao Paulo: Governo Do Estado De Sao Paulo [citado 20 septiembre, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.stm.sp.gov.br/index.php/planos-e-projetos/atualizacao-da-rede-metropolitana-de-alta-e-media-capacidade>>

TRENEANDO. El choque de dos trenes en el metro de Sao Paulo deja cerca de cuarenta heridos [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 20 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://treneando.com/2012/05/17/el-choque-de-dos-trenes-en-el-metro-de-sao-paulo-deja-cerca-de-cuarenta-heridos/>>

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES. Estudios Interdisciplinarios en Problemáticas Internacionales y Locales (CEIPIL). Buenos Aires: La Universidad, 2013. 120 p.