

## TABLA DE CONTENIDO

<b>2.2.24.1 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ</b>	<b>3</b>
<b>2.2.24.2 ASPECTOS RELEVANTES ASOCIADOS A LA PRIMERA LINEA DEL METRO DE BOGOTÁ</b>	<b>6</b>
<b>2.2.24.3 BENCHMARK (EXPERIENCIAS INTERNACIONALES)</b>	<b>6</b>
2.2.24.3.1 Metro de Hanoi	7
2.2.24.3.1.1 Descripción general del proyecto	7
2.2.24.3.1.2 Estándar	7
2.2.24.3.1.1.3 Descripción del sistema de extinción de incendio	7
2.2.24.3.1.4 Estado del Proyecto	8
2.2.24.3.2 Metro de Dubái (línea roja y verde)	8
2.2.24.3.2.1 Descripción general del proyecto	8
2.2.24.3.2.2 Estándar	8
2.2.24.3.2.3 Descripción del sistema de extinción de incendio	8
2.2.24.3.2.4 Estado del proyecto	9
2.2.24.3.3 Metro de Santiago - Línea 7	9
2.2.24.3.2.1 Descripción general del proyecto	9
2.2.24.3.2.2 Estándar	9
2.2.24.3.2.3 Descripción del sistema de extinción de incendio	9
2.2.24.3.2.4 Estado del proyecto	9
2.2.24.4 Metro de París – Extensión de la línea 14	9
2.2.24.4.1 Descripción general del proyecto	10
2.2.24.4.2 Estándar	10
2.2.24.4.3 Descripción del sistema de extinción de incendio	10
2.2.24.4.4 Estado del proyecto	10
2.2.24.5 CONCLUSIONES	9

## 2.2.24 PROYECTO TÚNEL - SISTEMA CONTRA INCENDIOS

<b>Disciplina:</b>	<b>Lucha contra incendios</b>
<b>Entregable de referencia:</b>	<b>ET24 – Proyecto de túnel</b>

### 2.2.24.1 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ

<b>Entregable de referencia:</b>	Producto 6 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias. Entregable 10 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias / Informe de Sistemas y Operación	
<b>Actividades desarrolladas en el marco del estudio de prefactibilidad:</b>	El estudio de prefactibilidad indica, en términos muy generales, las pautas a seguir para el diseño del sistema de extinción de incendios. Los principales requisitos funcionales de los sistemas de detección y extinción de incendio se describen y analizan a continuación.	
<b>Conclusiones del estudio de prefactibilidad:</b>	Se observa que el proyecto en cuestión no contiene ningún dimensionamiento preliminar de los equipos de extinción de incendios como bombeos, etc.	
<b>Ítem</b>	<b>Aspectos relevantes</b>	<b>¿Cómo atenderlos en el marco de la asesoría técnica?</b>
<b>Sistema de detección de incendios</b> (p79-18.12)	El sistema permite la detección lineal de calor y es capaz de dar información sobre la extensión, la localización y la dirección del incendio a lo largo de los túneles. El sistema incluye: <ul style="list-style-type: none"> <li>- las centrales de control de las temperaturas en el túnel distribuidas en las estaciones que contienen los dispositivos ópticos para la emisión del rayo láser, la elaboración y el tratamiento de la señal de retorno, los dispositivos electrónicos adicionales, etc.</li> <li>- 1 ordenador de subsistema para la gestión y el control local de la instalación y para la interconexión con el CCO (Centro Control Operativo)</li> <li>- 1 bucle (espiras) para cada central, cada uno compuesto por cables bi-fibra óptica multi-modo (las dos fibras son una la reserva de la otra) insertadas en una única funda externa.</li> </ul>	Anotado. En el estudio de prefactibilidad no se hace mención de sistemas de detección de incendio a proveer en los técnicos locales. Este aspecto debe ser definido.

	Los cables están fijados a una cuerda colgada a la bóveda de los túneles.	
<b>Extintores</b> (p80 – artículo 18.13)	En los locales técnicos del interior de las obras de ventilación de los túneles de línea, deben preverse para cada local técnico que contenga equipos eléctricos, un extintor portátil de CO2 de 5 kg que respete lo que establecen los reglamentos locales contra incendios.	Anotado y confirmado.
<b>Sistema de extinción de gas</b>	-	En el estudio de prefactibilidad no hay algún requerimiento para el sistema de extinción de gas en los locales técnicos. No está claro cómo se entiende proteger los locales técnicos de señalización, telecomunicación y eléctricos. Este aspecto debe ser definido.
<b>Hidrantes</b> (p80 – artículo 18.14)	El sistema de extinción de incendios con hidrantes en los túneles de la línea tiene origen en la central contra incendios de la estación, mediante una central de control.	Anotado y confirmado. En el estudio de prefactibilidad no está indicado si el sistema de extinción de incendios con hidrantes debe ser seco o húmedo. Este aspecto debe ser definido.
<b>Fuente de alimentación de los hidrantes</b> (p80 – artículo 18.15)	El sistema debe ser alimentado hidráulicamente por una fuente capaz de suministrar de forma autónoma las condiciones de presión/caudal requeridas por los sistemas contra incendios de la estación.	Anotado y confirmado. Los aspectos de redundancia de la fuente de agua deben acordarse en la fase inicial de la asesoría técnica.
<b>Tubería de los hidrantes</b> (p80 – artículo 18.16)	La tubería alimentará los grupos de tomas hidrantes, compuestos de dos grifos esféricos con unión UNI 45. Adyacente al grupo se fijará a la pared una caja de acero galvanizado esp. 8/10 pintada RAL 3000 de dimensiones aproximadas de 600x500x200 mm con manguera y lanza.	Anotado. La tipología de toma de hidrantes depende de la legislación local e internacional a aplicar.
<b>Colocación de los grupos de tomas hidrantes</b> (p80 – artículo 18.17)	Los grupos de tomas hidrantes del túnel deben estar colocados cerca de los interruptores de emergencia eléctrica, para poder cortar la tensión a la línea de contacto.	Anotado.
<b>Distancia entre tomas de hidrantes</b> (p80 – artículo 18.18)	La distancia de los puntos de instalación de las tomas hidrantes en el túnel debe ser de 60m. El primer punto de detección de incendios estará a una distancia de la cabeza de estación de 30m.	La normativa de referencia por el diseño de la red de hidrantes debe ser indicada. La distancia de los puntos de instalación de las tomas hidrantes en el túnel debe ser confirmada por la Defensa Civil y la regulación local de protección contra incendios.

<p><b>Sprinkler</b> (p80 – artículo 18.19)</p>	<p>En caso de avería o incendio de un tren en el túnel, el objetivo es conducir a los usuarios hasta la estación; por lo que hay que proteger las estructuras de la vía de circulación de los trenes en correspondencia de la estación. Ésta debe estar protegida con el equipo de extinción de incendios automático con rociadores (“Sprinkler”)</p>	<p>Anotado. La tipología de sistema Sprinkler a implementar en las vías de estación no está indicada en el estudio de prefactibilidad. Debe ser definido si el sistema Sprinkler será de alta o baja presión. Además, debe ser definido si alguien local técnico debe ser equipado con este sistema.</p>
<p><b>Central por el sistema Sprinkler</b> (p80-18.20)</p>	<p>El sistema “Sprinkler” para la protección de la vía de circulación de los trenes para todos los tipos de estación, tiene origen desde la central contraincendios de la estación, mediante una especial central de control, hasta a la superficie de los andenes en correspondencia con las puertas del andén.</p>	<p>Anotado. La normativa de referencia por el diseño del sistema Sprinkler debe ser indicada.</p>
<p><b>Fuente de alimentación de Sprinkler</b> (p80-18.21)</p>	<p>El sistema debe estar alimentado hidráulicamente por una fuente capaz de suministrar de forma autónoma las condiciones de presión/caudal requeridas por los sistemas de detección de incendios de la estación.</p>	<p>Anotado y confirmado. Los aspectos de redundancia de la fuente de agua deben acordarse en la fase inicial de la asesoría técnica.</p>
<p><b>Aspectos críticos por atender:</b></p>	<p><b>A corto plazo para el desarrollo de las actividades de ingeniería conceptual (Aval Técnico y Fiscal – Fase 2):</b> Después de definir el tipo de infraestructura (mono/bi-tubo) que se construirá, se desarrollarán las siguientes actividades prioritarias:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Establecimiento de los estándares a seguir.</li> <li>- Establecimiento de la tipología de sistema de detección y extinción de incendio a proveer en los túneles, en el área pública de las estaciones y en los locales técnicos.</li> <li>- Dimensionamiento preliminar de los principales equipos de detección y extinción de incendio para proporcionar una estimación preliminar de los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX).</li> </ul>	<p><b>A mediano plazo para el desarrollo de las actividades de Estudios y Diseños para la Estructuración (Fase 3):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensionamiento de los sistemas de detección y extinción de incendio.</li> <li>- Dimensionamiento de las cámaras de bombeos en las estaciones y de las tuberías de los sistemas de extinción de incendios.</li> <li>- Redacción de las especificaciones técnicas de las instalaciones contra incendio.</li> <li>- Consolidación de los costos de inversión previamente estimados.</li> </ul>
<p><b>Interfaces:</b></p>	<p>En el estudio de prefactibilidad, no hay mención explícita a las interfaces ni a su tratamiento. A priori, se identifican las siguientes interfaces, que deberán gestionarse en el marco de la asesoría técnica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obra civil enterradas (túnel y estaciones).</li> <li>- Energía.</li> </ul>	

	- Sistema de gestión de mantenimiento.
<b>CAPEX y OPEX</b>	<p>En el estudio de prefactibilidad para el cálculo del presupuesto de inversión se adoptó información extraída por proyectos similares, considerando una estructura de costos dividida en 15 capítulos sin incluir predios, los cuales resultaron en un indicador costo de inversión por kilómetro, en pesos colombianos actualizados al mes de diciembre de 2020.</p> <p>El sistema de extinción de incendio se consideró junto con las instalaciones de ventilación y el valor global es 1.355,9 millones COP \$. En el estudio preliminar no hay datos que justifiquen este valor entonces actualmente no es posible proporcionar una verificación detallada de ello. De toda forma, este valor debe de ser revisado de acuerdo a las definiciones de equipos, en la etapa de Estudios y Diseños para la Estructuración, dependiendo también de la tipología de infraestructura que se realizará.</p>

#### 2.2.24.2 ASPECTOS RELEVANTES ASOCIADOS A LA PRIMERA LINEA DEL METRO DE BOGOTÁ

En tema de sistema de extinción de incendio en túnel no hay aspectos relevantes asociados a la PLMB ya que esta línea se desarrolla completamente en viaducto.

#### 2.2.24.3 BENCHMARK (EXPERIENCIAS INTERNACIONALES)

La agrupación y, en particular, SYSTRA tiene una gran experiencia en el diseño de sistemas de lucha contra incendio en sistemas metropolitanos realizados en todo el mundo.

Las siguientes secciones tienen como objetivo presentar el principio fundamental del sistema de protección contra incendios para varios metros diseñados en el mundo.

Para cada proyecto de metro que se presenta a continuación, se indican los siguientes datos principales:

- Descripción general del proyecto (longitud del tramo subterráneo, tipo de túnel, presencia más o menos de las puertas de andén, ...).
- Estándares utilizados.
- Descripción del sistema de extinción de incendio.
- Estado del proyecto (en diseño u operación).

Se presentan los siguientes proyectos internacionales principales:

- Metro de Hanoi
- Metro de Dubái - Líneas roja y verde
- Metro de Santiago - Línea 7

- Metro de París – Extensión de la línea 14

### **2.2.24.3.1 Metro de Hanoi**

#### **2.2.24.3.1.1 Descripción general del proyecto**

La línea de metro ligero de Hanoi, sección Nhon - Estación de Hanoi, es un proyecto importante de la ciudad de Hanoi. Según el Plan Maestro de Transporte de Hanoi, la longitud total de la Línea 3 de Hanoi es de 21.5 km desde Nhon a Hoang Mai.

La primera fase de esta línea va de Nhon a la estación de Hanoi, con un tramo elevado de 8.5 km y un tramo subterráneo de 4.0 km.

Esta línea tiene doce (12) estaciones, ocho (8) estaciones elevadas y cuatro (4) estaciones subterráneas.

La sección subterránea es un túnel bi-tubo con una distancia promedio entre las estaciones de máximo 700 m (dependiendo de la interestación), entonces no está requerido proporcionar pozos de ventilación intermedios entre estaciones.

Las estaciones del metro no están equipadas con puertas de andenes.

#### **2.2.24.3.1.2 Estándar**

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar NFPA 130 además de las normativas locales.

#### **2.2.24.3.1.1.3 Descripción del sistema de extinción de incendio**

Para la sección del túnel y el área pública de la estación, se proporciona un sistema de extinción de incendios con hidrantes de tipo húmedo.

Para la zona técnica de las estaciones (como cuarto de telecomunicaciones, señalización, etc.), se proporciona un sistema de supresión de gas.

Para la sala de basura se proporciona un sistema de rociadores “Sprinkler”.

Se proporciona un tanque de agua dedicado para suministrar agua al sistema de extinción de incendios con hidrantes.

#### **2.2.24.3.1.4 Estado del Proyecto**

El diseño está validado por la autoridad local competente. El tramo subterráneo está en construcción.

### **2.2.24.3.2 Metro de Dubái (línea roja y verde)**

#### **2.2.24.3.2.1 Descripción general del proyecto**

El proyecto del Metro de Dubái será un LRT (tren ligero) totalmente automatizado que se ejecutará en dos líneas: la línea roja y la línea verde. La mayor parte de las dos líneas corre elevada. Los tramos subterráneos de las dos líneas se encuentran en el “Central Business District” de Dubái. La línea roja recorre más de 51 km desde el puerto de Jebel Ali en el sur hasta Rashidiya en el norte. A lo largo de la línea roja, hay veintiocho (28) estaciones: veinticuatro (24) estaciones elevadas y cuatro (4) estaciones subterráneas, incluidas las dos (2) estaciones de transferencia que conectan con la futura línea verde. La línea verde recorre casi 16 km desde el aeropuerto hasta “Health Care City” en el área de Oud Metha. A lo largo de la línea verde, hay veintiuno (21) estaciones: trece (13) estaciones elevadas y seis (6) estaciones subterráneas, incluidas las dos (2) estaciones de transferencia que conectan con la línea roja.

La sección subterránea es principalmente un túnel monotubo con una interdistancia promedio de la estación de alrededor 1000 m – 2000 m (dependiendo de la interestación). Se proporciona un pozo de ventilación intermedio en cada interestación de la línea roja.

Las estaciones del metro están equipadas con puertas de andenes de altura completa.

#### **2.2.24.3.2.2 Estándar**

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar NFPA 130 además de las normativas locales.

#### **2.2.24.3.2.3 Descripción del sistema de extinción de incendio**

Para la sección del túnel y el área pública de la estación, se proporciona un sistema de extinción de incendios con hidrantes de tipo húmedo. Para la zona técnica de la estación (como cuarto de telecomunicaciones, señalización, etc.), se proporciona un sistema de supresión de gas. Se proporciona un tanque de agua dedicado para suministrar agua al sistema de extinción de incendios con hidrantes.

#### **2.2.24.3.2.4 Estado del proyecto**

El metro de Dubái está en operación desde 2009.

#### **2.2.24.3.3 Metro de Santiago - Línea 7**

##### **2.2.24.3.2.1 Descripción general del proyecto**

La construcción de la Línea 7 considera diecinueve (19) estaciones en una longitud de 26 kilómetros, tres (3) estaciones de combinación con la Red actual en Estación Cal y Canto (L2, L3), Baquedano (L1, L5), Pedro de Valdivia (L1), además de la combinación en Isidora Goyenechea (L6) producto de la ampliación de la L6 y la construcción de un Taller de revisión y estacionamiento de trenes ubicado en la comuna de Renca.

La sección subterránea es un túnel monotubo con interdistancia promedio de la estación de alrededor entre 500 y 2200 m (dependiendo de la interestación).  
Dependiendo de la longitud de la interestación, se implementarán uno o dos pozos de ventilación intermedios. No hay ningún pozo de ventilación en los extremos de las estaciones.  
Las estaciones del metro no están equipadas con puertas de andenes.

#### **2.2.24.3.2.2 Estándar**

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar NFPA 130 (donde sea aplicable, dependiendo de las limitaciones de la obra civil) además del estado del arte de la línea existente.

#### **2.2.24.3.2.3 Descripción del sistema de extinción de incendio**

Ningún sistema de extinción de incendios con hidrantes está planteado ni en túnel ni en área pública de estación.

#### **2.2.24.3.2.4 Estado del proyecto**

El diseño está validado por la autoridad local competente.

#### **2.2.24.4 Metro de París – Extensión de la línea 14**

##### **2.2.24.4.1 Descripción general del proyecto**

La extensión de la línea 14 en París incluye cuatro (4) estaciones subterráneas y un túnel de aproximadamente 5.8 km de longitud. En el proyecto también está previsto un túnel de conexión a la zona de estacionamiento de los trenes (zona sin pasajeros), esta zona está fuera del alcance.  
La sección subterránea es un túnel monotubo con una distancia entre estaciones de 600 y 1800 m (dependiendo de la interestación).  
Dependiendo de la longitud de la interestación, se implementan uno o dos pozos de ventilación intermedios. Para algunas estaciones, la planta de ventilación se proporciona sólo en un extremo de la estación. En cada extremo de las estaciones, se ubica un pozo de compensación para limitar la velocidad del aire dentro de la estación.  
Las estaciones del metro están equipadas con puertas de andenes de media altura.

##### **2.2.24.4.2 Estándar**

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar francés.



#### **2.2.24.4.3 Descripción del sistema de extinción de incendio**

Para la sección del túnel y el área pública de la estación, se proporciona un sistema de extinción de incendios con hidrantes de tipo seco. No se proporciona un tanque de agua dedicado para suministrar agua al sistema de extinción de incendios con hidrantes. La conexión se realiza a la red de la ciudad.

#### **2.2.24.4.4 Estado del proyecto**

La línea 14 está en operación.

#### **2.2.24.5 CONCLUSIONES**

Como mencionado, en el estudio de factibilidad no se ha desarrollado algún dimensionamiento del sistema de extinción de incendio. Las informaciones contenidas en el estudio serán consideradas como punto de partida para el desarrollo de la etapa de Estudios y Diseños para la Estructuración.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>2.2.24.1 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ</b>	<b>2.2.24.2 ASPECTOS RELEVANTES ASOCIADOS A LA</b>
<b>PRIMERA LÍNEA DEL METRO DE BOGOTÁ</b>	<b>BENCHMARK (EXPERIENCIAS INTERNACIONALES)</b>
<b>82.2.24.3.1</b>	<b>Metro de Hanoi</b>
2.2.24.3.1.1 Descripción general del proyecto	9
2.2.24.3.1.2 Estándar	9
2.2.24.3.1.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel	10
2.2.24.3.1.4 Estado del Proyecto	10
2.2.24.3.2 Metro de Dubái (línea roja y verde)	11
2.2.24.3.2.1 Descripción general del proyecto	11
2.2.24.3.2.2 Estándar	11
2.2.24.3.2.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel	11
2.2.24.3.2.4 Estado del proyecto	12
2.2.24.3.3 Metro de Santiago - Línea 7	12
2.2.24.3.3.1 Descripción general del proyecto	12
2.2.24.3.3.2 Estándar	12
2.2.24.3.3.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel	13
2.2.24.3.3.4 Estado del proyecto	13
2.2.24.3.4 Metro de París – Extensión de la línea 14	13
2.2.24.3.4.1 Descripción general del proyecto	13
2.2.24.3.4.2 Estándar	14
2.2.24.3.4.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel	14
2.2.24.3.4.4 Estado del proyecto	14
<b>2.2.24.4 CONCLUSIONES</b>	<b>14</b>

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

**Disciplina:**

**Sistema de ventilación de túneles**

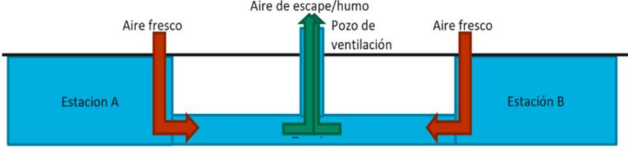
<b>Entregable de referencia:</b>	<b>ET24 – Proyecto de túnel</b>
----------------------------------	---------------------------------

### 2.2.24.1 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ

<b>Entregable de referencia:</b>	Producto 4 – Estudios y diseños de prefactibilidad. Entregable 6 – Prediseño geométrico del trazado / Definición estructura Metro ferroviarias. Producto 6 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias. Entregable 10 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias / Informe de Sistemas y Operación.	
<b>Actividades desarrolladas en el marco del estudio de prefactibilidad:</b>	El estudio de prefactibilidad indica, en términos muy generales, las pautas a seguir para el diseño del sistema de ventilación del túnel. Los principales requisitos funcionales del sistema de ventilación del túnel se describen y analizan a continuación.	
<b>Conclusiones del estudio de prefactibilidad:</b>	Se observa que el proyecto en cuestión no contiene ningún cálculo de dimensionamiento preliminar de los equipos de ventilación como ventiladores y silenciadores, mientras que se ha proporcionado algún detalle más sobre el dimensionamiento de las cámaras de ventilación que se proporcionarán en las estaciones subterráneas. Sin embargo, las dimensiones de la cámara de ventilación, los pozos y las rejillas de ventilación y extracción de humos del túnel se revisarán a la luz de los resultados de los cálculos y simulaciones. Además, el resultado del análisis multicriterio, desarrollado en el estudio de prefactibilidad, recomienda implementar la tipología bi-tubo. Esta solución será evaluada más en detalle y será definida la tipología más apropiada para este proyecto y el sistema de ventilación será designado de consecuencia.	
<b>Entregable de referencia:</b>	Producto 4 – Estudios y diseños de prefactibilidad. Entregable 6 – Prediseño geométrico del trazado / Definición estructura Metro ferroviarias.	
<b>Ítem</b>	<b>Aspectos relevantes</b>	<b>¿Cómo atenderlos en el marco de la asesoría técnica?</b>
<b>Pozos de ventilación</b> (p114 - artículo 13.3)	En términos de ubicación y número de las salidas de emergencia, se hace referencia a la norma americana NFPA 130, la cual prevé una distancia máxima entre salidas de emergencia de 762 m.	Ubicación y número de las salidas de emergencia (pozos) serán establecidos de acuerdo con la norma NFPA130 teniendo en cuenta cuanto sigue: - Dentro de vías de tren cerradas, la distancia máxima entre salidas no debe exceder los 762 m. - Se permitirá el uso de pasillos transversales en lugar de salidas donde las vías del tren están en túnel bi-tubo. Cuando se utilicen pasillos transversales en

		lugar de salidas, la distancia entre ellos no será superior a 244 m.
<b>Sistema de ventilación</b> (p116 - artículo 13.7)	De forma preliminar, se considera un sistema con ventiladores de impulsión y extracción (push-pull) debido a que ofrece una operación más flexible en su uso en comparación con ventiladores de impulsión solamente.	Anotado y confirmado.
<b>Sistema de ventilación</b> (p116 - artículo 13.8)	La ventilación del túnel se ubicará en ambos extremos de las estaciones subterráneas para ventilar el tramo de túnel colindante.	En el marco de la asesoría técnica, se estudiarán soluciones óptimas según la tipología de la infraestructura (mono/bi-tubo).
<b>Ventilación de la cola de maniobras</b> (p116 - artículo 13.10)	Para la ventilación de la cola de maniobras al oriente de la Estación n°1, se contará con una ventilación específica desde el final de la cola de maniobras (pozo o a través de un nivel intermedio de la estructura construida en trinchera cubierta).	Anotado. A priori se recomienda proveer un pozo al final de la cola de maniobra. Este aspecto será definido una vez que el trazado haya sido delineado.
<b>Ventilación de estaciones</b> (p116 - artículo 13.11)	La ventilación y el aire acondicionado en estaciones será independiente de la ventilación de túneles.	Anotado y confirmado.
<b>Vía de escape</b> (p116 - artículo 13.13)	En situación de emergencia, un túnel será la vía de escape y lugar seguro para el otro túnel. En este caso se reforzará la ventilación en el túnel no afectado, generando una ligera sobrepresión.	Anotado. Este concepto se confirmará una vez delineada la tipología de infraestructura a realizar (monotubo o bi-tubo).
<b>Cámaras de ventilación</b> (p117 - artículo 13.21)	Las cámaras de ventilación serán accesibles para mantenimiento y serán conectadas eléctricamente y controladas desde el centro de control.	Anotado y confirmado.
<b>Ubicación de los ventiladores</b> (p117 - artículo 13.22)	Los ventiladores se ubicarán en orientación horizontal.	Anotado. Dependiendo del espacio disponible, se sugiere dejar abierta la posibilidad de instalar los ventiladores en vertical.
<b>Entregable de referencia:</b>	Producto 6 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias. Entregable 10 – Propuesta de integración de Sistemas infraestructura Metro ferroviarias / Informe de Sistemas y Operación.	
<b>Ítem</b>	<b>Aspectos relevantes</b>	<b>¿Cómo atenderlos en el marco de la asesoría técnica?</b>
<b>Pozos de ventilación</b> (p79 – artículo 18.7)	Para cada tramo de túnel distribuido entre dos estaciones profundas se prevé un pozo de ventilación situado en posición lo más posible baricéntrica.	Se evaluará la necesidad y el número de pozos a proveer entre dos estaciones profundas de acuerdo con la tipología de infraestructura a realizar. En particular:

		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si la infraestructura será por monotubo, se proporcionará un pozo de ventilación cada 762m como máximo de acuerdo con la NFPA 130. Este pozo se utilizará tanto para evacuación como para ventilación.</li> <li>- Si la infraestructura será bi-tubo, a priori no se prevén pozos de ventilación entre dos estaciones ya que la evacuación se realizará mediante pasajes transversales previstos cada 244m como máximo y la ventilación será gestionada por las cámaras de ventilación en los extremos de las estaciones. Sin embargo, se evaluará la inserción de pozos de ventilación para asegurar la presencia de un solo tren en cada zona de ventilación. Esta verificación se realizará en función del intervalo entre trenes y la velocidad del tren en la línea.</li> </ul>
<b>Pozos de compensación en los dos extremos de las estaciones</b> (p79 – artículo 18.8)	En los dos extremos de las estaciones adyacentes se prevén dos tomas de aire (pozos de compensación) que ponen directamente en comunicación el túnel con el ambiente exterior. La sección útil de dichas tomas de aire es de unos 15m <sup>2</sup> cada una.	Dependiendo de la tipología de la infraestructura (mono / bi-tubo) se evaluará si utilizar estos pozos también como cámaras de ventilación o solo para la gestión del efecto pistón. La sección útil se definirá según la función del pozo.
<b>Pozos de ventilación</b> (p79 – artículo 18.11)	<p>Todos los pozos cuentan con a lo menos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Una cámara de ventilación compuesta por ventiladores, silenciadores e instalaciones eléctricas.</li> <li>- Dos cuartos técnicos (por redundancia) que contienen las cabinas MT/BT.</li> <li>- Salida de emergencia.</li> </ul> <p>En todas las salidas de emergencia, existe la posibilidad de entrar desde ambos pasillos de emergencia/servicio del túnel.</p>	Anotado y confirmado.

<p><b>Sistema de ventilación túnel</b> (p81 – artículo 18.23)</p>	<p>Figura 18.24 Sistema de ventilación túnel</p>  <p>Fuente: Unión Temporal Egis-Steer Metro de Bogotá, 2021</p>	<p>Esta solución no permite dirigir los humos y tampoco se recomienda para la tipología bi-tubo. En el marco de la asesoría técnica, se estudiarán soluciones óptimas y más flexibles según la tipología de la infraestructura.</p>
<p><b>Normal funcionamiento</b> (p81 – artículo 18.24)</p>	<p>En el caso de normal funcionamiento de operación, la cámara de ventilación funciona en aspiración con un caudal reducido respecto al máximo disponible (25% del caudal máximo).</p>	<p>La necesidad de activar o no la ventilación en funcionamiento normal depende de la temperatura alcanzada en el túnel. Por lo tanto, los ventiladores se activarán automáticamente solo si se alcanza el umbral de temperatura máxima. Generalmente, durante el funcionamiento normal, la extracción de aire caliente de los túneles y la entrada de aire fresco se realiza mediante el efecto de pistón del tren a través de los pozos de compensación en los dos extremos de las estaciones.</p>
<p><b>Emergencia por incendio</b> (p81 – artículo 18.25)</p>	<p>En caso de emergencia por incendio, el caudal se incrementa hasta el nivel máximo disponible. La dirección del aire en todos los tramos del túnel es siempre la misma respecto a la situación anterior, simplemente se aumenta la velocidad.</p>	<p>Consulte la respuesta al punto p81 – artículo 18.23.</p>
<p><b>Norma de referencia</b> (p81 – artículo 18.27)</p>	<p>El dimensionamiento de la cámara de ventilación está relacionado con la situación de emergencia de incendio. La norma de referencia es la norma americana NFPA 130.</p>	<p>Debe especificarse qué versión de la norma se considerará para el diseño.</p>
<p><b>Consumo de energía</b> (p53-14.19)</p>	<p>Se ha considerado un pozo de ventilación entre todas las estaciones enterradas, con un consumo de 250kVA.</p>	<p>Por el momento no es posible verificar la veracidad de estos datos ya que en el estudio de prefactibilidad no existen cálculos ni especificaciones técnicas de los ventiladores. El consumo de energía se definirá en el marco de la asesoría técnica de acuerdo con el esquema de ventilación seleccionado y las características de los ventiladores.</p>
<p><b>Sistema de control de humo en estación</b></p>	<p>-</p>	<p>Este aspecto no está mencionado en el estudio de prefactibilidad. Los requerimientos deben ser clarificados.</p>

<p><b>Aspectos críticos por atender:</b></p>	<p><b>A corto plazo para el desarrollo de las actividades de ingeniería conceptual (Aval Técnico y Fiscal – Fase 2):</b></p> <p>Después de definir el tipo de infraestructura (mono tubo/bi-tubo) que se construirá, se desarrollarán las siguientes actividades prioritarias:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Establecimiento de los estándares a seguir.</li> <li>- Definición y establecimiento de la potencia de fuego a considerar para el dimensionamiento de la ventilación de túnel.</li> <li>- Cálculo preliminar de la velocidad crítica a alcanzar para evitar que los humos invadan el área aguas abajo del fuego.</li> <li>- Definición preliminar de la necesidad de pozos de ventilación/evacuación entre estaciones.</li> <li>- Dimensionamiento preliminar de los equipos de ventilación para proporcionar una estimación preliminar de los costos de inversión (CAPEX) y de operación (OPEX).</li> </ul>	<p><b>A mediano plazo para el desarrollo de las actividades de Estudios y Diseños para la Estructuración (Fase 3):</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Definición de la metodología de cálculo y dimensionamiento del sistema de ventilación de túnel.</li> <li>- Definición de los principios de funcionamiento del sistema de ventilación de túnel y consolidación de los pozos de ventilación a proveer.</li> <li>- Dimensionamiento del sistema de ventilación, incluyendo todos los equipos.</li> <li>- Dimensionamiento de las cámaras de ventilación.</li> <li>- Validación del sistema de ventilación propuesto por la infraestructura por medio de análisis unidimensionales, con software tipo SES, y análisis CFD tridimensionales para simular los efectos de un incendio en los túneles.</li> <li>- Redacción de las especificaciones técnicas de los equipos de ventilación.</li> <li>- Consolidación de los costos de inversión previamente estimados.</li> </ul>
<p><b>Interfaces:</b></p>	<p>En el estudio de prefactibilidad, se identifican las siguientes interfaces, que deberán gestionarse en el marco de la asesoría técnica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Obra civil enterradas (túnel y estaciones)</li> <li>- Energía</li> <li>- Puertas de andén</li> <li>- Sistema de gestión de mantenimiento</li> <li>- Centro de control operacional</li> </ul>	
<p><b>CAPEX y OPEX</b></p>	<p>En el estudio de prefactibilidad para el cálculo del presupuesto de inversión se adoptó información extraída por proyectos similares, considerando una estructura de costos dividida en 15 capítulos sin incluir predios, los cuales resultaron en un indicador costo de inversión por kilómetro, en pesos colombianos actualizados al mes de diciembre de 2020.</p>	



	<p>El sistema de ventilación se consideró junto con las instalaciones contra incendio y el valor global es 1.355,9 COP \$. En el estudio preliminar no hay datos que justifiquen este valor entonces actualmente no es posible proporcionar una verificación detallada de ello. Cabe señalar que en nuestra experiencia este valor es bastante bajo. De toda forma, este valor debe de revisado de acuerdo a las definiciones de equipos, en la etapa de Estudios y Diseños para la Estructuración, dependiendo también da la tipología de infraestructura que se realizará.</p>
--	--

#### 2.2.24.2 ASPECTOS RELEVANTES ASOCIADOS A LA PRIMERA LINEA DEL METRO DE BOGOTÁ

En tema de sistema de ventilación de túnel no hay aspectos relevantes asociados a la PLMB ya que esta línea se desarrolla completamente en viaducto.

#### 2.2.24.3 BENCHMARK (EXPERIENCIAS INTERNACIONALES)

La agrupación y, en particular, SYSTRA tiene una gran experiencia en el diseño de sistemas de ventilación para túneles metropolitanos realizados en todo el mundo. Las siguientes secciones tienen como objetivo presentar el principio fundamental del sistema de ventilación de túneles para varios metros diseñados en el mundo.

Para cada proyecto de metro que se presenta a continuación, se indican los siguientes datos principales:

- Descripción general del proyecto (longitud del tramo subterráneo, tipo de túnel, presencia más o menos de las puertas de andén, ...).
- Estándares utilizados.
- Descripción del sistema de ventilación del túnel.
- Estado del proyecto (en diseño u operación).

Se presentan los siguientes proyectos internacionales principales:

- Metro de Hanoi
- Metro de Dubái - Líneas roja y verde
- Metro de Santiago - Línea 7
- Metro de París – Extensión de la línea 14

De forma general, a continuación, se indican las principales lecciones aprendidas durante el desarrollo de proyectos internacionales que principalmente están relacionadas a las interfaces entre el sistema de ventilación del túnel y otras disciplinas.

1. Interfaz con la Obra Civil:

Hay tres temas principales: uno se refiere a la optimización de los espacios necesarios para la definición de los volúmenes de las cámaras de ventilación. La tendencia es siempre reducir al máximo estos espacios para optimizar los costes de la obra civil.

El segundo está conectado con la cerca de la mejor configuración de los pozos de ventilación en términos de circuito de área, limitando cuanto más se pueda la presencia de curvas o cambios de secciones, para optimizar la pérdida de presión y por lo tanto el tamaño del ventilador.

El último se refiere a la ubicación de los amortiguadores que compuerta la reservación de agujeros estructurales entonces debe ser gestionado junto con la disciplina estructural.

2. Interfaz con Arquitectura / Urbanismo:

El sistema de ventilación de túnel requiere grandes pozos ubicados ya sea a nivel del suelo o hasta 6 m sobre el nivel de la calle. La ubicación de las rejillas de superficie que se proporcionarán sobre el suelo para el escape de humo es un tema típico que debe analizarse cuidadosamente teniendo en cuenta las limitaciones urbanas.

3. Interfaz con la disciplina Eléctrica:

Dado que los ventiladores del sistema de ventilación de túnel suelen ser los equipos con mayor demanda de potencia, se debe tener especial cuidado en la interfaz con el diseño eléctrico.

4. Interfaz con la Defensa Civil:

El proyecto del sistema de ventilación de túnel y, más en general, el proyecto de la seguridad contra incendio requiere la validación del diseño por parte del departamento de defensa civil entonces las discusiones con este organismo se recomiendan ya desde las primeras etapas del diseño.

### 2.2.24.3.1 Metro de Hanoi

#### 2.2.24.3.1.1 Descripción general del proyecto

La línea de metro ligero de Hanoi, sección Nhon - Estación de Hanoi, es un proyecto importante de la ciudad de Hanoi. Según el Plan Maestro de Transporte de Hanoi, la longitud total de la Línea 3 de Hanoi es de 21.5 km desde Nhon a Hoang Mai.

La primera fase de esta línea va de Nhon a la estación de Hanoi, con un tramo elevado de 8.5 km y un tramo subterráneo de 4.0 km.

Esta línea tiene doce (12) estaciones, ocho (8) estaciones elevadas y cuatro (4) estaciones subterráneas.

La sección subterránea es un túnel bi-tubo con una distancia promedio entre las estaciones de máximo 700 m (dependiendo de la interestación), entonces no es requerido proporcionar pozos de ventilación intermedios entre estaciones.

Las estaciones del metro no están equipadas con puertas de andenes.

#### 2.2.24.3.1.2 Estándar

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar NFPA 130 además de las normativas locales.

### 2.2.24.3.1.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel

El objetivo principal del sistema de ventilación de túnel es manejar el funcionamiento en modo normal, en modo de congestión y en modo de emergencia.

- Para el funcionamiento en modo normal, el objetivo es mantener una temperatura aceptable dentro del túnel para permitir un correcto funcionamiento de los equipos y garantizar el confort de los pasajeros.
- Para la operación gestionada, el objetivo es mantener una condición aceptable para el funcionamiento del sistema de aire acondicionado a bordo del tren y mantener una condición aceptable a lo largo de la pasarela en caso de evacuación de pasajeros.
- Para la operación en modo de emergencia, el objetivo es alcanzar la velocidad crítica y mantener una condición sostenible en la ruta de evacuación de los pasajeros.

Los principios fundamentales son los siguientes:

- Durante el funcionamiento en modo normal, la ventilación natural se produce por medio del efecto pistón de los trenes a través de los pozos de compensación ubicados en cada pozo de ventilación. Cuando la ventilación natural no es suficiente, se activa la ventilación forzada.
- Durante el modo congestionado, el sistema de ventilación forzada se activa en la dirección del movimiento del tren para crear una corriente de aire sobre el sistema de aire acondicionado a bordo del tren.
- Durante el modo de emergencia, el sistema de ventilación forzada se activa en el modo “push-pull”. La dirección preferida del aire es la dirección del movimiento del tren para aprovechar el efecto pistón.

El sistema de ventilación es totalmente reversible. Significa que el humo puede ser extraído en ambos sentidos (ya sea en el sentido del movimiento del tren o en sentido contrario). Se propone un solo tren por cada zona de ventilación.

La locación de los equipos es la siguiente:

- La cámara de ventilación del túnel se encuentra en cada extremo de las estaciones subterráneas.
- No se requieren pozos de ventilación intermedios a lo largo del túnel.
- Dos ventiladores están ubicados en cada cámara de ventilación.
- Ventiladores de impulsión están ubicados en la entrada del túnel, en la zona del portal, y cerca de la primera estación de metro.

La capacidad de los ventiladores es de aproximadamente 80 m<sup>3</sup>/s por ventilador.

La potencia de fuego propuesta es de 10 MW. El tipo de crecimiento del fuego es aproximado con el modelo  $\alpha t^2$ , donde  $\alpha$  es la constante que gobierna la velocidad de crecimiento en acuerdo con el estándar NFPA 92B.

### 2.2.24.3.1.4 Estado del Proyecto

El diseño está validado por la autoridad local competente. El tramo subterráneo está en construcción.

### 2.2.24.3.2 Metro de Dubái (línea roja y verde)

### 2.2.24.3.2.1 Descripción general del proyecto

El proyecto del Metro de Dubái será un LRT (tren ligero) totalmente automatizado que se ejecutará en dos líneas: la línea roja y la línea verde. La mayor parte de las dos líneas corre elevada. Los tramos subterráneos de las dos líneas se encuentran en el “Central Business District” de Dubái. La línea roja recorre más de 51 km desde el puerto de Jebel Ali en el sur hasta Rashidiya en el norte. A lo largo de la línea roja, hay veintiocho (28) estaciones: veinticuatro (24) estaciones elevadas y cuatro (4) estaciones subterráneas, incluidas las dos (2) estaciones de transferencia que conectan con la futura línea verde. La línea verde recorre casi 16 km desde el aeropuerto hasta “Health Care City” en el área de Oud Metha. A lo largo de la línea verde, hay veintiuno (21) estaciones: trece (13) estaciones elevadas y seis (6) estaciones subterráneas, incluidas las dos (2) estaciones de transferencia que conectan con la línea roja.

La sección subterránea es principalmente un túnel monotubo con una interdistancia promedio de la estación de alrededor 1000 m – 2000 m (dependiendo de la interestación). Se proporciona un pozo de ventilación intermedio en cada interestación de la línea roja.

Las estaciones del metro están equipadas con puertas de andenes de altura completa.

### 2.2.24.3.2.2 Estándar

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar NFPA 130 además de las normativas locales.

### 2.2.24.3.2.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel

El objetivo principal del sistema de ventilación de túnel es manejar el funcionamiento en modo normal, en modo de congestión y en modo de emergencia.

- Para el funcionamiento en modo normal, el objetivo es mantener una temperatura aceptable dentro del túnel para permitir un correcto funcionamiento de los equipos y garantizar el confort de los pasajeros.
- Para la operación congestionada, el objetivo es mantener una condición aceptable para el funcionamiento del sistema de aire acondicionado a bordo del tren y mantener una condición aceptable a lo largo de la pasarela en caso de evacuación de pasajeros.
- Para la operación en modo de emergencia, el objetivo es alcanzar la velocidad crítica y mantener una condición sostenible en la ruta de evacuación de los pasajeros.

Los principios fundamentales son los siguientes:

- Durante el funcionamiento en modo normal y congestionado, la ventilación forzada es generalmente requerida. Cuando la ventilación forzada no es suficiente, se activará una unidad de tratamiento de aire dedicada para suministrar aire refrigerado en el túnel.
- Durante el modo de emergencia, el sistema de ventilación forzada se activa en el modo “push-pull”. Para alcanzar la velocidad crítica, puede ser requerido activar los ventiladores en más de dos pozos.

La locación de los equipos es la siguiente:

- La cámara de ventilación del túnel se encuentra en cada extremo de las estaciones subterráneas.
- En la línea roja, está planeado un pozo de ventilación intermedio entre las estaciones a lo largo del túnel.
- Dos ventiladores están ubicados en cada cámara de ventilación.

La capacidad de los ventiladores es entre 80 m<sup>3</sup>/s y 110 m<sup>3</sup>/s por ventilador.

La potencia de fuego propuesta es de 10 MW. El tipo de crecimiento del fuego es aproximado con el modelo  $\alpha t^2$ , donde  $\alpha$  es la constante que gobierna la velocidad de crecimiento en acuerdo con el estándar NFPA 92B.

#### **2.2.24.3.2.4 Estado del proyecto**

El metro de Dubái está en operación desde 2009.

#### **2.2.24.3.3 Metro de Santiago - Línea 7**

##### **2.2.24.3.3.1 Descripción general del proyecto**

La construcción de la Línea 7 considera diecinueve (19) estaciones en una longitud de 26 kilómetros, tres (3) estaciones de combinación con la Red actual en Estación Cal y Canto (L2, L3), Baquedano (L1, L5), Pedro de Valdivia (L1), además de la combinación en Isidora Goyenechea (L6) producto de la ampliación de la L6 y la construcción de un Taller de revisión y estacionamiento de trenes ubicado en la comuna de Renca.

La sección subterránea es un túnel monotubo con interdistancia promedio de la estación de alrededor entre 500 y 2200 m (dependiendo de la interestación).

Dependiendo de la longitud de la interestación, se implementarán uno o dos pozos de ventilación intermedios. No hay ningún pozo de ventilación en los extremos de las estaciones.

Las estaciones del metro no están equipadas con puertas de andenes.

##### **2.2.24.3.3.2 Estándar**

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar NFPA 130 (donde sea aplicable, dependiendo de las limitaciones de la obra civil) además del estado del arte de la línea existente.

##### **2.2.24.3.3.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel**

El objetivo principal del sistema de ventilación de túnel es manejar el funcionamiento en modo normal y en modo de emergencia.

- Para el funcionamiento en modo normal, el objetivo es mantener una temperatura aceptable dentro del túnel para permitir un correcto funcionamiento de los equipos y garantizar el confort de los pasajeros.
- Para la operación en modo de emergencia, el objetivo es alcanzar la velocidad crítica y mantener una condición sostenible para la evacuación de pasajeros.

Los principios fundamentales son los siguientes:

- Durante el funcionamiento en modo normal, la ventilación natural se produce por medio del efecto pistón de los trenes a través de un pozo de compensación ubicado en cada pozo de ventilación y también del acceso a las estaciones. Cuando la ventilación natural no es suficiente, se activa la ventilación forzada.
- Durante el modo de emergencia, el sistema de ventilación forzada se activa en el modo “push-pull”. La dirección preferida del aire es la dirección del movimiento del tren para aprovechar el efecto pistón.

El sistema de ventilación no es reversible. Significa que el humo se extrae solo en una dirección (desde el fuego hasta el primer pozo de ventilación).

La locación de los equipos es la siguiente:

- La cámara de ventilación de túnel se encuentra en los pozos intermedios entre cada interestación.
- No están planteados pozos de ventilación en los extremos de las estaciones.
- Hay solo un ventilador por cada cámara de ventilación. Cuando es posible, la redundancia está asegurada por el segundo pozo de ventilación a lo largo del túnel. De lo contrario, no hay redundancia.

La capacidad de los ventiladores es de aproximadamente 150 m<sup>3</sup>/s por ventilador.

La potencia de fuego propuesta es de 10 MW. El tipo de crecimiento del fuego es aproximado con el modelo  $\alpha t^2$ , donde  $\alpha$  es la constante que gobierna la velocidad de crecimiento en acuerdo con el estándar NFPA 92B.

#### **2.2.24.3.3.4 Estado del proyecto**

El diseño está validado por la autoridad local competente.

#### **2.2.24.3.4 Metro de París – Extensión de la línea 14**

##### **2.2.24.3.4.1 Descripción general del proyecto**

La extensión de la línea 14 en París incluye cuatro (4) estaciones subterráneas y un túnel de aproximadamente 5.8 km de longitud. En el proyecto también está previsto un túnel de conexión a la zona de estacionamiento de los trenes (zona sin pasajeros), esta zona está fuera del alcance.

La sección subterránea es un túnel monotubo con una distancia entre estaciones de 600 y 1800 m (dependiendo de la interestación).

Dependiendo de la longitud de la interestación, se implementan uno o dos pozos de ventilación intermedios. Para algunas estaciones, la planta de ventilación se proporciona sólo en un extremo de la estación. En cada extremo de las estaciones, se ubica un pozo de compensación para limitar la velocidad del aire dentro de la estación.

Las estaciones del metro están equipadas con puertas de andenes de media altura.

##### **2.2.24.3.4.2 Estándar**

La infraestructura está diseñada en acuerdo a los requerimientos del estándar francés.

#### 2.2.24.3.4.3 Descripción del sistema de ventilación del túnel

El objetivo principal del sistema de ventilación de túnel es manejar el funcionamiento en modo normal y en modo de emergencia.

- Para el funcionamiento en modo normal, el objetivo es mantener una temperatura aceptable dentro del túnel para permitir un correcto funcionamiento de los equipos y garantizar el confort de los pasajeros.
- Para la operación en modo de emergencia, el objetivo es alcanzar la velocidad mínima de 1.5m/s en las proximidades del fuego con una velocidad adyacente de 0.5 m/s.

Los principios fundamentales son los siguientes:

- Durante el funcionamiento en modo normal, la ventilación natural se produce por medio del efecto pistón de los trenes a través de los pozos de compensación ubicados en los extremos de cada estación. Cuando la ventilación natural no es suficiente, se activa la ventilación forzada.
- Durante el modo de emergencia, el sistema de ventilación forzada se activa en el modo “push-pull”. Para alcanzar la velocidad mínima de 1.5m/S en la proximidad del fuego, ventiladores adicionales pueden ser activados en modo de inyección o extracción. El objetivo principal es limitar la propagación del humo dentro de los 800 m.

La locación de los equipos es la siguiente:

- La cámara de ventilación de túnel se encuentra en los pozos intermedios entre cada interestación.
- Pozos de ventilación están planteados solo en algún extremo de las estaciones, dependiendo de la densidad urbana.
- Dos ventiladores están ubicados en cada cámara de ventilación. Un pozo está equipado con 3 ventiladores.

La capacidad de los ventiladores es de 100 m<sup>3</sup>/s por ventilador.

La potencia de fuego propuesta es de 4.7 MW. El tipo de crecimiento del fuego es aproximado con el modelo  $\alpha t^2$ , donde  $\alpha$  es la constante que gobierna la velocidad de crecimiento en acuerdo con el estándar NFPA 92B.

#### 2.2.24.3.4.4 Estado del proyecto

La línea 14 está en operación.

#### 2.2.24.4 CONCLUSIONES

Como mencionado, en el estudio de factibilidad no se ha desarrollado algún dimensionamiento del sistema de ventilación de túnel. Las informaciones contenidas en el estudio serán consideradas como punto de partida para el desarrollo de la etapa de Estudios y Diseños para la Estructuración. En el marco de la asesoría técnica será realizado un estudio de ventilación que incluye análisis unidimensionales, con software SES, para validar el correcto funcionamiento del sistema diseñado, así como análisis CFD tridimensionales para simular los efectos de un incendio en los túneles. En el diseño del sistema de ventilación se tendrán en cuenta tanto la ventilación sanitaria normal, cuyo funcionamiento vendrá gobernado por la monitorización de la calidad del aire en el túnel (temperatura, niveles de CO, etc.), como la ventilación de emergencia en caso de un incendio en el túnel. En este último caso se tendrán en cuenta las posibles posiciones del foco del incendio y las rutas de evacuación.

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

Sin embargo, la ventilación será diseñada, pensando en la evacuación del humo producido por un incendio.



## TABLA DE CONTENIDO

2.2.24 ET24 - PROYECTO DE TÚNEL	5
2.2.24.1 NORMATIVIDAD APLICABLE	5
2.2.24.1.1 NORMATIVIDAD NACIONAL	5
2.2.24.1.2 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL	5
2.2.24.1.3 REFERENCIAS APLICABLES	9
2.2.24.2 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA L2MB	10
2.2.24.3 ASPECTOS RELEVANTES DE LOS ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA PLMB	54
2.2.24.3.1 LÍNEA 1 METRO DE BOGOTÁ - SUBTERRÁNEA	54
2.2.24.4. BENCHMARK (experiencias internacionales)	70
2.2.24.4.1. LÍNEA 12, METRO DE CIUDAD DE MÉXICO	70
2.2.24.4.2. METRO DE TURÍN: MONITOREO DE LA EXCAVACIÓN CON EPBM	76
2.2.24.4.2.1 Rendimiento y Producción	77
2.2.24.4.2.2. Extracción de Lodos	77
2.2.24.4.2.3. Relleno de Grouting	77
2.2.24.4.2.4. Acondicionamiento del Suelo	78
2.2.24.4.3 LÍNEA 1 DEL METRO DE QUITO	78
2.2.24.4.4 LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA	81
2.2.24.4.5. LÍNEA 9 DEL METRO DE BARCELONA.	81
2.2.24.4.6. LÍNEA 4, METRO RIO DE JANEIRO	85
2.2.24.4.7. METRO DE BAKÚ AZERBAIYÁN	86
2.2.24.5. CONCLUSIONES	89

## LISTA DE TABLAS

*Tabla 1. Tipo de sección SLMB y sistema constructivo*

*Tabla 2. Criterios y subcriterios definidos para analizar la opción Bitúnel versus Mono túnel.*

*Tabla 3. Valores de la matriz de análisis Multicriterio según la prefactibilidad*

*Tabla 4. Características de las máquinas*

*Tabla 5. Características de las dovelas*

*Tabla 6. Característica de los materiales de las dovelas*

*Tabla 7. Asentamientos estimados para el Túnel de emergencia*

## LISTA DE FIGURAS

*Figura 1. Unidades Geológicas según FOPAE-2010- Fuente: Egis-Ester( 2021)*

*Figura 2. Fallas Geológicas - INGEOMINAS -2005- Fuente: Egis - Steer( 2021)*

*Figura 3. Unidades hidrogeológicas -Fopae 2001- Fuente: Egis- Steer( 2021)*

*Figura 4. Esquema de ubicación sistema Túnel.- Fuente: Egis-Steer ( 2021)*

*Figura 5. Sección Tipo Bi-túnel.Fuente: Egis-Steer( 2021)*

*Figura 6. Sección Típica túnel entre pantallas o soterrado- Fuente : Egis - Steer (2021)*

*Figura 7. Sector cola de maniobras y Estación No.1 - Fuente: Egis-Steer( 2021)*

*Figura 8. Ubicación opción Bitúnel sector deprimido Av. Caracas- Fuente : Egis - Steer( 2021)*

*Figura 9. Perfil V2 sistema metro- Fuente: Egis - Steer( 2021)*

*Figura 10. Paso por debajo del Canal Arzobispo- Fuente: Egis-Steer( 2021)*

*Figura 11. Conducción Acueducto Tibitoc 78" y pasó Línea 2 Metro Bogotá- Fuente: Egis - Steer(2021)*

*Figura 12. Paso por debajo del Canal Salitre- Fuente : Egis-Steer( 2021)*

*Figura 13. Paso de la Línea Subterránea por debajo del Brazo del Humedal Juan Amarillo- Fuene : Egis Steer(2021)*

*Figura 14. Sección transversal paso opción Bitúnel por debajo del brazo del Humedal Juan Amarillo-Fuente: Egis- Steer( 2021)*

*Figura 15. Sección típica soterrada en el tramo 7- Fuente: Egis - Steer(2021)*

*Figura 16. Paso por la zona del Canal Cafam - Fuente : Egis Steer(2021)*

*Figura 17. Alternativa 1 propuesta en la zona de cola de maniobras- Fuente: Egis Steer(2021)*

*Figura 18. Perfil solución propuesta en la zona de cola de maniobras y pasó debajo del deprimido Av. Caracas- Fuente: Egis - Steer*

*Figura 19. Alternativa 2 propuesta en la zona de cola de maniobras- Fuente: Egis Steer( 2021)*

*Figura 20. Valorizaciones análisis Multicriterios según EMB: Fuente: EMB( 2021)*

*Figura 21. Sección Tipo Túnel entre pantallas zona cola maniobras según prefactibilidad- Fuente: Egis - Steer( 2021)*

*Figura 22. Alternativa planteada por EMB sector paso por debajo deprimido Av. Caracas y Estación 1- Fuente: EMB( 2021)*

*Figura 23. Alternativa propuesta en zona cola de maniobras según EMB- Fuente: EMB(2021)*

*Figura 24. Perfil sector rotonda intersección Cra 7 con Calle 72 - Corredor verde - Fuente: Ingetec ( 2017)*

*Figura 25. Vista en planta Línea 1 Metro de Bogotá- Opción subterránea - Fuente: IDU( 2015)*

*Figura 26. Sección típica Túnel( Mono)- Fuente: IDU( 2015)*

*Figura 27. Sección Tipo Túnel entre pantallas- Fuente IDU( 2015)*

*Figura 28. Túnel en trinchera*

*Figura 29. Configuración del Muro colapsado en la calle 72 en 1994*

*Figura 30. Proceso de ensamble de la máquina EPB - Benamar(2012)*

*Figura 31. ICA. (2012). Infraestructura línea 12 del metro. Vector de la ingeniería civil. Ciudad de México, México.*

*Figura 32. Máquinas EPB utilizadas en el Metro de Quito*

*Figura 33. Detalles del Metro de Quito- Mono Túnel*

*Figura 34. Sectores de la L9 de Barcelona*

*Figura 35. Planta geológica del área de Barcelona.*

*Figura 36. Máquina EPM utilizada en el Metro de Barcelona*

*Figura 37. Zona de transición entre macizo rocoso y arenoso*

*Figura 38. Sección Tipo Línea metro 1 de Panamá- Mono túnel*

*Figura 39. Estación típica - Línea 1 Metro de Panamá*

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

## 2.2.24 ET24 - PROYECTO DE TÚNEL

<b>Disciplina: Geotecnia</b>	<b>Proyecto de túnel</b>
<b>Entregable de referencia:</b>	<b>Entregable 8 / ET24 - Proyecto de túnel</b>

### 2.2.24.1 NORMATIVIDAD APLICABLE

#### 2.2.24.1.1 NORMATIVIDAD NACIONAL

- Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10. Año 2010, Decreto N° 926 de 2010. Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes.
- Decreto 92 del 17 de enero de 2011 que modificó el decreto 926 de 2010.
- Decreto 523 de 16 de Diciembre de 2010 “Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C”.
- Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP14
- Normas Técnicas Colombianas – NTC

#### 2.2.24.1.2 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL

##### Normas y/o guías Americanas

- ACI 318R-11 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute
- AISC 360-05 Specification for structural Steel buildings. American Institute of Steel Construction.
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 350-06. Design Considerations for Environmental Engineering Concrete Structures.
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 116R Cement and Concrete Terminology
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 201.1R Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 212.3R Chemical Admixtures for Concrete
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 216R Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements

- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 221R Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 222R Protection of metal in concrete against corrosion.
- Instituto Americano del Concreto. Norma ACI 318/318R Building Code Requirements for Structural Concrete, and Commentary.
- Instituto Americano del Concreto Norma ACI 224R. Control de fisuración de Estructuras de Concreto.
- American Concrete Institute( ACI).ACI 544.7R(2016)- Report on Design and Construction of Fiber Reinforced Concrete Tunnel Segments
- NFPA 130 \_Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems
- Building response to excavation-induced settlement. By Marco D. Boscardin and Edward J. Cording. Members, ASCE
- Deep excavation and tunnelling in soft ground. G. Report.7th. Int. Symp. on S.M. and F.E. Mexico. State of the Art Voluma: 225-258

#### Normativa Europea

- Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Ground investigation and testing
- Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining Structures and geotechnical aspects.
- Comité Europeo de Normalización. Eurocódigos EN-1990 a EN-1999
- European Committee for Standardization (CEN), “Railway applications —The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) - Part 1: Basic requirements and generic process”, European Norm EN 50126-1:1999, 1999
- European Commission, “Commission Regulation (EU) No 1303/2014 of 18 November 2014 concerning the technical specification for interoperability relating to ‘safety in railway tunnels’ of the rail system of the European Union”, TSI-SRT, 2014
- Union International des Chemin Fer (UIC), ”UIC-Codex 779-9 - Safety in Railway Tunnels”, August 2003

#### Normatividad o guías Inglesas

- BS 6164:2019: 2011 HEALTH AND SAFETY IN TUNNELLING IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY. CODE OF PRACTICE
- BS 6031(2009): 2009 CODE OF PRACTICE FOR EARTHWORKS BS ISO 14837-1: 2005 MECHANICAL VIBRATION - GROUND-BORNE NOISE AND VIBRATION ARISING FROM RAIL SYSTEMS - PART 1: GENERAL GUIDANCE
- BS EN 16191: 2014 TUNNELLING MACHINERY - SAFETY REQUIREMENTS
- BSI PAS 8810(2016)-British Standards Institute (BSI) - Tunnel Design. Design of concrete segments tunnel linings. Code of practice
- Specification for tunnelling – The British Tunnelling Society (BTS) and The Institution of Civil Engineers
- BS 6164:2011, Code of Practice for safety in tunneling in the construction industry.

### Normativa Austriaca

- AUSTRIAN ONORM B 2203-1 (2001): Driving of mined tunnels – contract standards. Part 1: cyclic excavation.
- AUSTRIAN ONORM B 2203-2: Driving of mined tunnels – contract standards. Part 2: continuous excavation.
- AUSTRIAN GUIDELINES OF THE RESEARCH ASSOCIATION FOR ROADS AND TRAFFIC RVS 9.24 (1992): General and geotechnical preparatory work.
- AUSTRIAN GUIDELINES OF THE RESEARCH ASSOCIATION FOR ROADS AND TRAFFIC RVS 9.31 (1994): Static design, Cut and Cover.
- AUSTRIAN GUIDELINES OF THE RESEARCH ASSOCIATION FOR ROADS AND TRAFFIC RVS 9.32 (1994): Static design, Tunnels mined in soft underground covered with buildings.
- AUSTRIAN GUIDELINES OF THE RESEARCH ASSOCIATION FOR ROADS AND TRAFFIC RVS 9.34 (1995): Concrete for permanent lining.
- ÖVBB(2011)- Austrian Society for Concrete and Construction Technology - Guideline for Concrete Segmental Lining Systems
- ÖENORM B 2203-2:2005-01-01 Underground works – Works contract – Part 2:Continuous driving, 2005 edition.
- ÖENORM B 2203-2:2005-01- 01 Underground works – Works contract – Part 2: Continuous driving, 2005 edition.
- Austrian Research Institute for Road and Rail Transport (FSV): Health and Safety on underground construction sites, 2017.

### Normativa y Guías Alemanas

- German rail (DB), DS 853: Design, construction and maintenance of rail tunnels.
- ETB – Germany (1995): Guidelines of the working group “Tunnelling”, Ernst und Sohn, Berlin.
- DAUB ( 2013) German Tunnelling Committee( DAUB) -Lining Segments Design: Recommendations for the Design, Production, and installation of segmental rings.
- STUVATec (2005). German Research Association for Underground Transportation Facilities
- Supplementary Technical Conditions of Contract and Guidelines for Engineering Structures (ZTV-ING), Part 5 Tunneling, Section 3 “Mechanized Shield Tunneling”; BAST (German Federal Agency for Road Construction); Status 2018/01).
- Guideline 853 “Design, Construction and Maintenance of Rail Tunnels” DB Netz AG 9th Version; 01.09.2018:
  - ❖ (Module 853.2001 “Structural Stability Calculations (including regulations concerning the actions from thrust cylinders of tunnel boring machines).
  - ❖ (Module 853.4001 “General rules for tunnelling, support and lining”)
  - ❖ (Module 853.4005 “Segmental Lining” (including regulations concerning annular gap grouting).
  - ❖ (Module 853.6001 “Construction, technical documents and documentation” (including regulation concerning the control of shield tunneling works).
- Regulations for Health and Safety on Construction Sites (RAB 25): Further details to the Compressed Air Regulations.
- DIN EN 16191:2014-09:Tunnelling machinery – Safety requirements; German Version EN 16191:2014.

- DIN EN 12110:2014-10: Tunnelling machines – Air locks – Safety requirements; German version EN 12110:2014.
- DIN EN 1997-1:2014-03: Eurocode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules; German version EN 1997-1:2004 + AC:2009 + A1:2013.
- DIN 18312:2019-09: German construction contract procedures (VOB) –Part C: General technical specifications in construction contracts (ATV) – Underground construction work).
- Recommendations for Face Support Pressure Calculations for Shield Tunnelling in Soft Ground, (German Tunnelling Committee (DAUB) e. V.).

#### Normativa y Guías Suizas

- Switzerland Codes and guidelines for tunnels SIA 197/1: Design of rail tunnels.
- Switzerland Codes and guidelines for tunnels SIA 198: Underground works.
- Switzerland Codes and guidelines for tunnels SIA 199: Exploration of underground.
- Switzerland Codes and guidelines for tunnels SIA 267: Geotechnical engineering.
- Management and recycling of tunnel spoil – Inventory of major swiss projects, FGU – Swiss Tunnelling Society.
- Swiss Tunnel Code, “SN 505 197/1, SIA 197/1:2003. Design of Tunnels - Railway Tunnels”, 20
- International Standards Organization ISO, “Fire safety engineering – Part 1: Application of fire performance concepts to design objectives”, ISO/ TR 13387-1, 1999
- International Standards Organization ISO, “Life-threatening components of fire – Guidelines for the estimation of time available for escape using fir data”, ISO 13571, 2012

#### Normativa y guías Francesas

- Colección de Recomendaciones de la AFTES para el diseño y construcción de túneles
- AFTES (2005) -French Tunnelling and Underground Engineering Association (AFTES)- Recommendation for the design, sizing and construction of precast concrete segments installed at the rear of a tunnel boring machine(TMB)

#### Normativa o Especificaciones Japonesas

- Standard Specifications for Tunneling- 2016: Shield Tunnels



### Normas Asiaticas

- LTA( 2008) Singapore Land Transport Authority ( LTA)-Civil Design Criteria for Road and Rail Transit Systems
- TB10020-2012, “Railway Tunnel Design Code on Disaster Prevention, Rescue and Evacuation”, China,C2012

### Normas o manuales Mexicanos

- Manual de Diseño Geotécnico- Covitur- Vol. 1

### 2.2.24.1.3 REFERENCIAS APLICABLES

- Recommendations and guidelines for tunnel boring machines (TBMs). Working group nº 14 - Mechanized tunneling – International Tunnelling Association (ITA)
- Guidelines for the Design of Segmental Tunnel Linings. ITA Working Group 2- Research. .
- Specification for tunnelling – The British Tunnelling Society (BTS) and The Institution of Civil Engineers
- Specification and guidelines for the use of specialist products for mechanized tunneling (TBM) in soft ground and hard rock. EFNARC - European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete
- Settlements induced by tunneling in soft ground. ITA/AITES Report 2006.
- Building response to excavation-induced settlement. By Marco D. Boscardin and Edward J. Cording. Members, ASCE
- Análisis de la subsidencia originada por la excavación de túneles. First National Spanish Symp. On tunnels. Madrid. Vol 1. 7th
- Deep excavation and tunnelling in soft ground. G. Report. Int. Symp. on S.M. and F.E. Mexico. State of the Art Voluma: 225-258
- The Madrid Model: A simplified approach to the tunnel subsidence estimation. C.S. Oteo. International Conference on Mathematical and Statistical Modeling in Honor of Enrique Castillo. June 28-30, 2006.
- Mechanized333 Shield Tunnelling.2012. Maid. B., Herrenknecht, M., Maudl, U., Wehrmeyer, G.
- Handbook of Tunnel Engineering. 2013. Vol I: Structures and Methods. Maidl,B., Thewes,m., Maidl,U
- Geotechnical Engineering Investigation HandBook. 2005. Hunt, E. R.
- U.S Department of Transportation Federal Highway Administration. Publication No. FHWA-NHI-10-034. 2009.Technical Manual for Road Tunnels - Civil Elements.
- Introduction to tunnel. 2010. Construcción.2010. Chapman, D., Metje, N., and Stärk, A.
- Ground Characterization and Structural Analyses for Tunnel Design. 2020. Celada, B.T., Bieniawski,Z.T
- Settlements induced by tunneling in soft ground. ITA/AITES Report 2006.

## 2.2.24.2 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA L2MB

<b>Entregables de referencia:</b>	Entregable 5.1 - Revisión geotécnica
<b>Actividades desarrolladas en el marco del estudio de prefactibilidad:</b>	<p>Este entregable se refiere a los aspectos de geología y geotecnia desarrollados en el estudio de prefactibilidad sobre la base de una revisión de información secundaria. La información consultada se basó en las investigaciones geotécnicas previas desarrolladas en el área de influencia del proyecto, de proyectos de vías, puentes, fases de transmilenio u otros, de tal forma que se pudiera contar con información relevante para la generación del modelo geotécnico en el corredor del estudio. Este entregable aborda el marco geológico definiendo el entorno geológico, geomorfológico, tectónico como una primera parte. Luego procede a presentar la información secundaria consultada, para pasar luego a realizar un diagnóstico geotécnico para el corredor de la línea dos del metro de Bogotá.</p> <p>Desde el punto de vista de marco geológico y con base en el Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (incluido en el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Decreto 523 de 2010)), la Línea 2 del Metro de Bogotá estará comprendida en dos formaciones de sedimentos principalmente: La Formación Sabana y La Formación Chía. La Formación Sabana ocupa la mayor parte del recorrido, cerca del 98%, representada por materiales de arcillas, arcillas limosas con trazas orgánicas e inter laminaciones de limos y turbas, de génesis fluvio lacustre y aluvial respectivamente. Esta formación a lo largo del trazado tiene espesores mayores a los 200 m. La Formación Chía se hace presente exclusivamente en el cruce de los humedales de Juan Amarillo, en los bordes de cauces menores, y cerca del río Bogotá. Esta formación está compuesta por depósitos constituidos por sedimentos fluviales de grano fino que afloran a lo largo de los ríos principales, que generalmente están por debajo de las llanuras de inundación.</p> <p>De acuerdo con la sectorización presentada en estudios para la Línea dos del Metro, la caracterización del subsuelo fue dividida en tres zonas debido a la estratigrafía homogénea y cuyas características principales se describen a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zona I comprendida entre el K0+000 al K0+450 de la L2MB, ubicada en el sector de la cola de maniobras, la cual está compuesta por materia orgánica con suelo limo-arcillosos o rellenos en la parte superficial con un espesor del orden de 2 m y depósitos coluviales, con clastos de arenisca en matriz areno-arcillosa, no plástico en una profundidad que va de los 2 m a 25 m. En esta zona se indica que pueden presentarse condiciones excepcionales en cuanto a la excavabilidad del material y los potenciales requerimientos de los métodos de excavación. Se menciona en la información de prefactibilidad que en términos generales el material en la zona difiere de la condición de material matriz-soportado con la presencia de clastos. Se indica además que la humedad puede estar cercana al 22% y los índices de plasticidad en promedio pueden ser del 17%.</li> <li>- La zona II, definida desde K0+450 a K7+900 de la L2MB , y comprendida en el sector entre la Estación 1 y la Estación 6 - tramo del corredor de la Calle 72. En esta zona se reporta material de relleno antrópico y suelo con contenido orgánico de medio a alto en una profundidad entre 0,0 m a (1,20 - 3,0 m). De los (1,20</li> </ul>

- 3,0 m) a (32,0 m - 40,0 m), se reportan arcillas limosas y ocasionalmente arenas limosas, con humedad media a alta y plasticidad alta a muy alta. También se menciona que la compresibilidad es muy alta. De los 32,0 - 40,0 m a los 80,0 m, se menciona la presencia de arcillas con bajos contenidos de limos, con humedad media y plasticidad media a alta. El perfil del subsuelo es relativamente homogéneo, con altos contenidos de humedad, con valores máximos de hasta 216% y en promedio 102%, siendo decrecientes en profundidad. El comportamiento del material es muy plástico, con un índice de plasticidad promedio del 96%.

- La zona III, va desde K7+900 (cercano a la Estación 7) a K15+760 (cercano a la Estación 11) de la L2MB, es decir, el tramo del trazado que va por la Av. Ciudad de Cali hasta el Patio taller. En este sector entre los 0,0 m y (0,70 a 2,40 m), se prevé material de relleno antrópico y suelos de contenido orgánico de medio a alto. Luego se espera desde los (0,70 m - 2,40 m) a los 22,10 m de profundidad, una arcilla con bajos contenido de limos y con humedad de alta a muy alta, con plasticidad alta a muy alta. El perfil del subsuelo en esta zona es relativamente homogéneo, compuesto por arcillas o arcillas con bajo contenido de limos, con un nivel del de plasticidad (en promedio del 98% del índice de plasticidad) y con humedades altas (en promedio del 103%, con picos de hasta 242 %). En esta zona hay presencia de humedales, que se asocian con posible susceptibilidad a cambios de volumen por alta compresibilidad de los suelos y a la alta humedad respectivamente.

En la Figura 1, se muestra la geología de la sabana de Bogotá

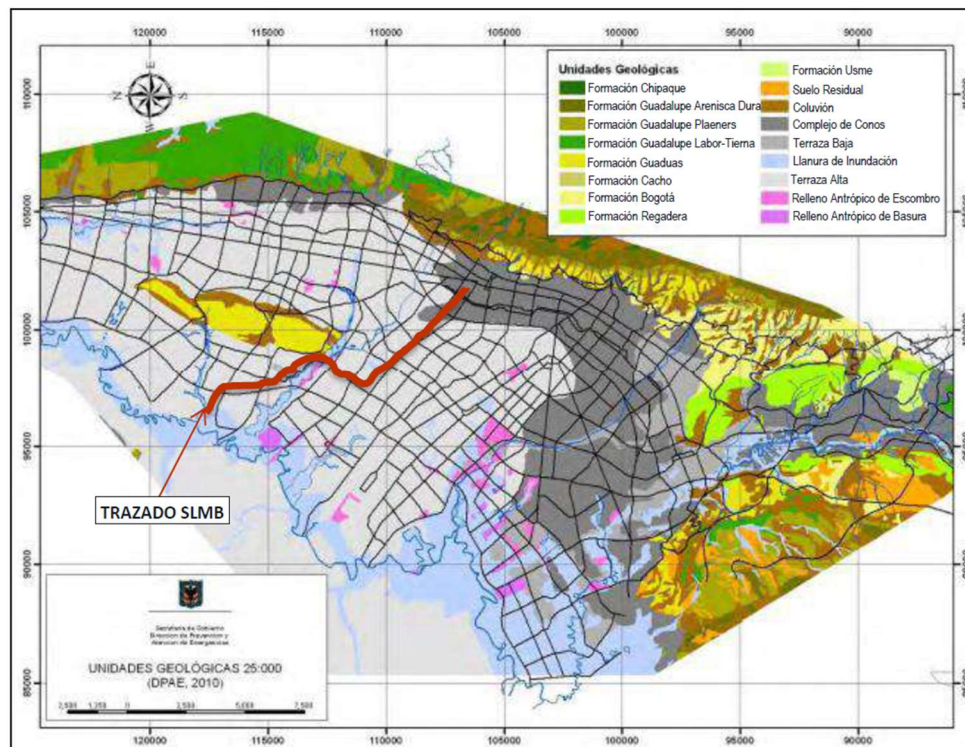


Figura 1. Unidades Geológicas según FOPAE-2010- Fuente: Egis-Ester( 2021)

Desde el punto de vista geoestructural la información geológica y geotécnica presenta unas estructuras cercanas al lineamiento de estudio, las cuales corresponden con: la Falla de Bogotá y la Falla Usaquén-Juan Amarillo. La falla de Bogotá bordea los cerros orientales de la sabana (Monserate y Guadalupe) y se extiende desde el Páramo de Sumapaz al sur de la sabana hasta el norte de la ciudad Bogotá y probablemente continúa más al norte debajo de los depósitos cuaternarios. Esta falla presenta un rumbo general N10°E y es inversa con dirección hacia el occidente. Se indica en la información de reeferencia que la Falla Usaquén-Juan Amarillo, no se está asociada a eventos sísmicos y no fue considerada en la microzonificación sísmica de la Sabana de Bogotá como fuente sísmica. Se trata de un rasgo sepultado entre los sedimentos de las Formaciones Chía y Bogotá, principalmente inferido a partir de sensores remotos e interpretación morfológica (Fierro, Et. Al, 2010), así como

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

por asociación con fuentes termales (Las Pléyades y Sie Chetupcua), en la zona del humedal Juan Amarillo y el Club Los Lagartos (Royo y Gómez, 1946). Véase Figura 2, con la localización de las fallas geológicas:



Figura 2. Fallas Geológicas - INGEOMINAS -2005- Fuente: Egis - Steer( 2021)

Por otra parte, de la información presentada en entregable 5.1, se indica que la mayor parte del alineamiento de la L2MB corresponde hidrogeológicamente a la unidad de terraza alta (Qta), siendo una superficie plana, ligeramente ondulada, que está disectada por el Río Bogotá y algunos de sus tributarios. Esta unidad está constituida por materiales predominantemente arcillosos con intercalaciones de niveles arenosos y gravas, pobremente estratificadas, principalmente de forma lenticular, de la Formación Sabana. Los niveles arenosos y de grava dentro de la unidad, reportados a través de perforaciones, se estiman con una porosidad primaria que les permite considerarse como acuíferos importantes. Los niveles arcillosos y limo-arcillosos se estiman con una porosidad primaria baja y muy baja.

Por otra parte en la zona inicial de la Línea arriba de la Av. Caracas, los estudios de prefactibilidad mencionan que esa zona corresponde con un complejo de conos (Qcc), compuesta por bloques, cantos y gravas de arenisca y chert, redondeados a subredondeados, con buena selección y en matriz areno-limosa color gris. Presenta intercalaciones lenticulares de arenas, con estratificación plano-paralela y cruzada. El mapa de unidades hidrogeológicas se puede observar en la Figura 3.

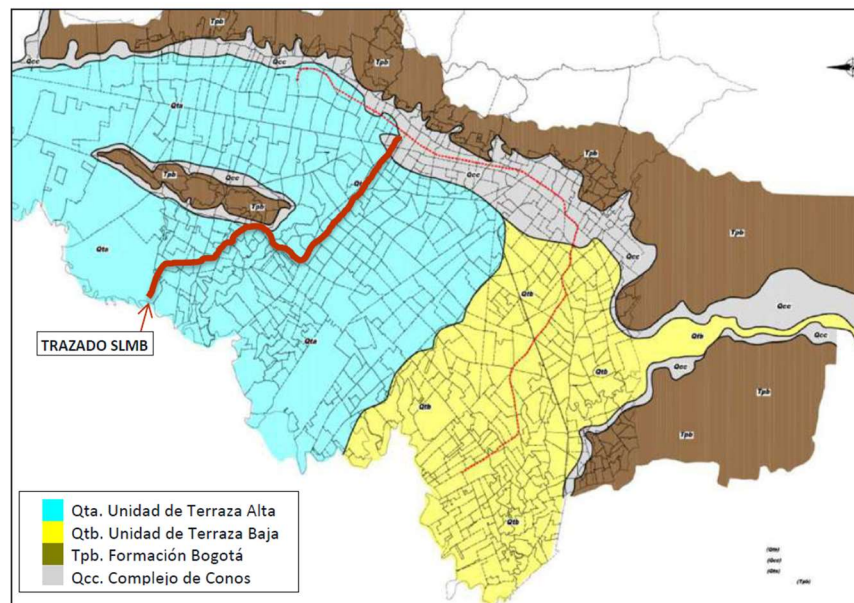


Figura 3. Unidades hidrogeológicas -Fopae 2001- Fuente: Egis- Steer( 2021)



Hidrogeológicamente, el depósito de Terraza Alta denominado acuífero Sabana (Qs), se caracteriza por ser continuo de extensión regional y multicapa con espesores de 50 a 500 m. En el Acuífero Sabana existen un total aproximado de 3600 pozos, de los cuales se encuentran en uso un número cercano a los 1700 pozos que producen caudales promedios entre 0.75 y 6.5 l/s con tiempos de bombeo promedio de 4 horas/día. Según la información del estudio de prefactibilidad, se indica que en total se extrae aproximadamente 1870 l/s, donde la transmisividad varía de 10 a 80 m<sup>2</sup>/ día, con un coeficiente de almacenamiento de 3E-06 hasta 5 E-07 y una conductividad hidráulica de 1.16 E-6 cm/s a 2.31 E-7 cm/s.

De los estudios existentes en el área se indica que los niveles freáticos son relativamente superficiales, entre 1 a 10 m de profundidad. Se indica además que en el primer sector homogéneo a partir de la Calle 72 con Cra 7, donde se pueden presentar presiones artesianas controladas por los depósitos granulares confinados, siendo una zona que está próxima a los cerros orientales sometidos a recarga. En la zona del cruce del humedal Juan Amarillo y la zona de Patio Taller, corresponden con zonas sujetas a amenazas de inundación. En la zona de Juan Amarillo, se estima también que se pueden presentar presiones artesianas asociadas con la presencia de la Falla Usaquén - Juan Amarillo.

Dentro del contexto geotécnico, a continuación se presenta en forma resumida la caracterización de los materiales a los que se verá enfrentada la L2MB, lo cual fue deducido del Entregable 5.1, a partir de la información secundaria de esos estudios geotécnicos y con lo cual, se establece los siguientes parámetros geotécnicos de los materiales:

- En la zona I, K0+000 a K0+450, se menciona que corresponde con masas coluviales con bloques y clastos en una matriz limo arcillosa. En esta zona se estiman ángulos de fricción para la profundidad de 0,0 m a 4,50 m del orden de 28°, de 4,50 m a 6,00 m del orden de 34° y para 6,0 m a 25,0 m del orden de 24° respectivamente.
- Zonas II( K0+450 A K7+900) y III( K7+900 A K15+760). En estas zonas los perfiles de suelo a lo largo de la Línea se reportan con materiales de relleno antrópico hasta cerca de los 3 m de profundidad seguido luego por arcillas. Se indica que se tiene una resistencia no drenada de media alta (100 y 150 kN/m<sup>2</sup>), la cual descende en los primeros 5 a 8 m a valores del orden de 20 a 30 kN/m<sup>2</sup>. Luego esta resistencia crece lentamente con la profundidad (entre 25 y 40 kN/m<sup>2</sup>) a los 10 m, y es poco variable entre los 15 a 25 m de profundidad, con valores de Su de 30 y 50 kN/m<sup>2</sup>. A partir de los 25 a los 50 m, crece lentamente entre los 50 y 53 kN/m<sup>2</sup>.
- Por otra parte, se reporta que las arcillas con trazas orgánicas exhiben ángulos de fricción entre 12° y 14°, y cohesiones efectivas muy variables entre 10 y 20 kPa. En relación con las arcillas limosas con menores contenidos de materia orgánica, presentan un ángulo de fricción efectivo de 18 a 25° (los mayores valores en CL) y cohesiones efectivas con aún mayor dispersión, entre 18 y 40 kPa. Las arenas intercaladas en el perfil según la información disponible presentan valores con ángulos de fricción de 30° y cohesión de 10 kPa.
- La velocidad de ondas de corte predominantes en los perfiles de todo el recorrido de la línea presentan valores del orden de los 100 m/s, indicando que los materiales son de muy baja rigidez.
- Desde el punto de vista de índice de compresibilidad se menciona que este es del orden de 1,0 en términos generales, con algunos sectores con valores de 4 para materiales orgánicos y con un rango generalizado de valores de 1 a 2, lo que es frecuente en el tramo desde la Calle 72 hasta la Avenida 68 y hasta terminar la Línea en Suba.
- La relación de sobreconsolidación (RSC) es superior a 4 en los primeros 5 a 8m de los perfiles y se reduce a valores del orden de 1,1 a 1,3 a mayor profundidad.

Desde el punto de vista de diagnóstico geotécnico, los estudios de prefactibilidad emiten varios conceptos acorde con la zonificación de los materiales a encontrar, de la siguiente forma:



- En la zona I, indican que hay incertidumbre en relación con la extensión de perfil lo que genera condiciones excepcionales en cuanto a la excavabilidad del material y los requerimientos de los métodos de excavación, por la presencia de bolos. Por ello mencionan que esto motivaría a realizar el trazo de este tramo con una solución cut & cover.
- En la zona II, se menciona que es más homogéneo el material, salvo ocasionales detecciones de arenas limosas y con condiciones variables de humedad natural en profundidad, por lo que consideran viable la implementación de un sistema de tuneladora. Mencionan que no se precisa la localización de los pozos.
- En la zona III, se indica que igualmente es una zona homogénea, pero resaltan que hay altos niveles de plasticidad y humedad, favorecidas por la presencia de humedales, siendo susceptible a cambios de volumen por alta compresibilidad. Se menciona que esta zona debe ser con tuneladora y una sección semienterrada ( con excavación en trinchera).

Desde el punto de riesgos o zonas críticas el estudio de prefactibilidad menciona lo siguiente:

- Se indica que en la zona I, pueden haber problemas especiales relacionados con presiones artesianas controladas por depósitos granulares confinados dada la proximidad a los cerros orientales sometidos a recarga.
- En la zona III, se indica que la zona del cruce del humedal de Juan Amarillo (IDIGER (2010) corresponde con una zona del recorrido sujeta a amenazas de inundación, junto con la zona de implantación del patio taller. Esta zona (Juan Amarillo), también puede presentar sectores de presiones artesianas, asociadas con la presencia de la Falla Usaquén – Juan Amarillo.
- Dada la presencia de arcillas limosas con plasticidades, compresibilidades y humedades altas se espera alta susceptibilidad al cambio volumétrico. Se menciona que existe una subsidencia generalizada en la sabana, donde hacia los sectores de la L2MB y sobre la Calle 72 entre Av. Caracas y carrera 24 se reportan de 0.5 a 3 cm en 7 años de asentamiento. Según estudios para la primera línea del Metro de Bogotá, indican que las estaciones provocarán depresiones significativas del nivel freático con subsidencia importantes. Resaltan que dada las construcciones antiguas y la precariedad estructural de algunas de esas edificaciones (con cimentaciones de predominio superficial), hará que se requiera de sistemas de protección.
- Se resalta la presencia de capas orgánicas y láminas de turbas que pueden ser capaces de generar gases o que generen toxicidad para el personal en el frente de la excavación y riesgos de incendio o explosión.

El estudio del entregable 5.1, plantea luego una serie de recomendaciones sobre las exploraciones mínimas que deben ser llevadas a cabo en la siguiente fase del proyecto, y que fueron extrapoladas a la Especificación Técnica ET 10. Estas recomendaciones fueron tenidas en cuenta dentro del Plan de exploraciones geotécnicas desarrollado por MOVIUS. También se menciona que se debe realizar un estudio de respuesta sísmica local para atender la respuesta de los túneles puentes y viaductos, partiendo del NSR-10 para un periodo de retorno de 475 años ( edificaciones y estaciones ) y otro ajustando el espectro de la Microzonificación sísmica de Bogotá a un periodo de 1000 años como lo exige el CCP-14. Referencias:

Fierro, J. (2009). "La Relación de la Geología y las Aguas Subterráneas". Grupo de Investigación en Geología Ambiental TERRAE.

**Conclusiones del estudio de prefactibilidad:**

A continuación se presentan puntos a tomar en cuenta que deben ser mejorados en desarrollo de los estudios de factibilidad:

- Se concluye que no aparece el basamento rocoso en la exploración consultada secundaria. En consecuencia, las obras se ejecutarán y cimentarán en suelos blandos. Solo se detectan algunas diferencias en el perfil de suelos en la zona de la Carrera Séptima con Calle 72, donde se presenta un gran espesor de coluvion aluvial, con bloques de arenisca en matriz arenosa arcillosa o limo arcillosa, que será de importancia para el diseño del túnel.
- El informe menciona que queda pendiente por definir la interacción de la estación de la Calle 72 de la L1MB.
- Se reporta la presencia de arcillas limosas, a veces orgánicas, con compresibilidad, humedad altas y baja consistencia, con niveles freáticos muy cerca de superficie. También se indica que ocasionalmente se presentarán estratos delgados de arenas de densidad media cerca de la Av. Caracas, como del pie de los Cerros de Suba, con bancos de arena aluvial.
- Anticipan subsidencias de 1 a 5 cm. Se indica que el efecto de depresión podría generar solicitudes adicionales en las estructuras subterráneas y en las fundaciones profundas y asentamientos en las edificaciones. Por lo tanto, se deberán realizar análisis del efecto probable de la depresión del Nivel Freatico y las subsidencias que se causarán en la zona.
- Se puede requerir el diseño y construcción de obras de protección como son: cortinas de inyecciones, verticales para aislamiento o inclinadas en forma de “tienda canadiense”, o protecciones con micropilotes, o sistemas similares.
- Sugieren adelantar un estudio detallado de los tipos de construcciones que existen actualmente, su estado, y sus tipos de cimentación, particularmente a lo largo del corredor Calle 72 hasta Avenida Ciudad de Cali, plantear hipótesis de su evolución en el futuro y el impacto que podría tener sobre probables depresiones del nivel freático, las subsidencias y las obras del Metro.
- Se menciona que la comprensión de los fenómenos que podrían ocurrir, y la estimación de sus magnitudes serán de utilidad para prever y diseñar probables técnicas de protección como son: inyecciones y reinyecciones, pantallas, pilotes o micropilotes, y mejoramiento del terreno, o similares, con el propósito de reducir los daños que puedan ocurrir en las estructuras que existan durante el proceso constructivo y en el futuro, sobre las obras, al cambiar la urbanización cercana a la línea.
- Consideran que los túneles en suelos blandos, podrán construirse con máquinas tuneladoras de presión balanceada en el frente (EPB). Indican que existen experiencias exitosas en materiales de similares características, en varios sitios del mundo. En su diseño, deberán considerarse las presiones existentes al nivel de implantación y la presencia del nivel freático cerca de la superficie. También menciona el estudio que podrían requerirse también tratamientos especiales ocasionales en sitios más blandos para evitar o controlar cabeceos o desviaciones de la máquina ante presencia de contrastes marcados de rigidez. En esta parte es importante destacar que hacia la cola de maniobras y si se confirma con el plan de exploraciones geotécnicas la presencia de materiales mixtos como son gravas, será necesario revisar el tema de la EPB o de una máquina mixta que también pueda trabajar como SPB (Slurry Pressure balance), para lo cual se debe analizar la granulometría y el tamaño de posibles bloques de roca. Esto podría condicionar el método constructivo en esta parte.
- Para el sector de la carrera 7ª en la calle 72 y hasta el final de la estación de integración, recomiendan optar por la construcción con sistema “cut and cover”.
- En el corredor de la ALO, entre el K12+485 a K14+220, mencionan que los túneles serán relativamente someros donde se podrá requerir sistema Cut & Cover.
- Se indica que los pozos de lanzamiento y salida ubicados en el K12+485 y K0+616, a igual que las estaciones, requerirán de técnicas de excavación en suelos blandos, con pantallas con ademes (por estudiar) y anclajes.
- Se menciona que para protección de edificaciones susceptibles, se debe diseñar o implementar el uso de técnicas de protección para reducir los daños por deformaciones (submuraciones, pantallas, pilotes, micropilotes, inyecciones, reinyecciones, carpas canadienses o similares).
- Finalmente se concluye en el informe de prefactibilidad, que la exploración disponible a lo largo del corredor fue muy modesta en términos de densidad de ejecución, particularmente en el tramo de corredor en dirección Este –Oeste y en el último sector hacia el lote del Patio Taller. Se cuenta con pruebas para identificación y clasificación, pero con pocos ensayos de resistencia y compresibilidad y en menor grado (inexistente) ensayos para parámetros dinámicos.

A continuación se listan comentarios generales de parte de MOVIUS respecto a la revisión de este Entregable 5.1, el cual forma parte de la base geológica y geotécnica para el proyecto túnel:

- Queda pendiente de resolver la integración de la Línea de Metro con la estación de la Calle 72, que condiciona la metodología de construcción de los túneles en el sector.
- Dado que no se tiene de estudios previos un análisis referente al tipo de edificaciones adyacentes al trazado y el impacto que causaría la implantación de la Línea del Metro con sistema Bitunel o Mono Túnel y las estaciones con dichos sistemas, en los estudios actuales se desarrollará este aspecto siguiendo en todo la ET24 y ET25.
- Si bien el estudio plantea en términos generales el sistema constructivo con máquina EPB, se observa que se requiere de un análisis más detallado del proceso de construcción de los túneles con dicho sistema, a la luz de los resultados de la exploración geotécnica y de la implantación del trazado de la L2MB. El sistema EPB (Earth Pressure Balance) posiblemente requerirá algunas modificaciones para poder sortear los diferentes aspectos mencionados como posibles riesgos.
- En el sector de la ALO se propone la construcción de la línea soterrada con sistema Cut & Cover, pero no se tiene en cuenta que en esa zona se impactará las redes de alcantarillado y el canal Cafam que allí existe, aspecto que debe ser revisado previo al aval técnico.
- Para el planteamiento de las soluciones para excavaciones de estaciones y pozos de ataque y salida si bien los estudios previos plantean la solución de Cut & Cover, es claro la necesidad de implantar el método Invertido, con el fin de impactar lo menos posible los corredores viales, así como reducir el efecto de asentamiento en las zonas adyacentes.
- Dado que no hay perfiles geológicos a lo largo del trazado que permitan definir una caracterización más realista de los materiales deducido a partir de la información secundaria, en el estudio de factibilidad se desarrollarán estos acorde con lo solicitado en la ET24.

Ítem	Aspectos relevantes	¿Cómo atenderlos en el marco de la asesoría técnica?
<p><b>Exploraciones geotécnicas - Numeral 2.131- Pg 38</b></p> <p><b>Numeral 2.169. Pg 54</b></p> <p><b>Numerales 2.173 2.174, 2.175 y 2.176- Pg 55</b></p>	<p>-Revisión de la zonificación de los depósitos en la zona I para una mejor definición del sistema constructivo.</p> <p>-Detección de capas orgánicas y láminas de turbas que puedan generar gases.</p> <p>-Plan de exploración para la etapa de estructuración recomendados como mínimos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Con base en el avance de las exploraciones y revisando la información geológica y geotécnica que existe en la Carrera 7a y Calle 72</li> <li>- Verificación con el plan de exploración geotécnica propuesto y con base en las experiencias de exploración llevadas a cabo en estudios de ALO como en Av. Ciudad de Cali.</li> <li>- Se atiende con base en la ET10 y el plan de exploraciones entregado a FND y EMB</li> </ul>
<p><b>Modelos y Métodos de análisis - 2164- Pg 52</b></p>	<p>-Exploración adecuada y modelos de análisis que permitan establecer niveles de asentamiento y/o subsidencia debidos a las obras.</p> <p>-Estudiar en el diseño de los túneles gemelos el efecto combinado de las dos campanas de Gauss invertidas de asentamientos generados por estas obras. En caso de opción Mono Túnel, analizar el efecto de la cubeta de asentamientos y las implicaciones en las edificaciones cercanas al corredor de la L2MB</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Con base en modelos geologicos-geotecnicos retroalimentados con los resultados de las exploraciones en curso y realización de modelos 3D con Abaqus y Plaxis 2D y 3D, para estimativo de asentamientos, con miras a definir efectos en superficie como en las edificaciones y estructuras existentes. También se aplicarán métodos analíticos y semiempíricos para analizar asentamientos en contraste con los resultados de métodos numéricos.</li> <li>- Como modelos constitutivos se aplicarán, Mohr Columb, Cam Clay y/o Soft Soil dependiendo del tipo de material que se logre definir con las exploraciones geotécnicas y el análisis de toda la información geológica y geotécnica de estudios previos como de estudios en el área de influencia de la L2MB.</li> <li>- Se analizará el efecto cualquiera que sea la solución escogida con Bitúnel o Mono túnel.</li> </ul>
<p><b>Respuesta Sísmica</b></p> <p><b>Numeral 2.181- Pg 56</b></p>	<p>-Se debe realizar un estudio de respuesta sísmica local para atender la respuesta de los túneles puentes y viaductos, partiendo del NSR-10 para un periodo de retorno de 475 años ( edificaciones y estaciones ) y otro ajustando el espectro de la Microzonificación sísmica de Bogotá a un periodo de 1000 años como lo exige el CCP-14.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se adelantan las exploraciones pertinentes para obtener parámetros para la caracterización de los materiales y definir la respuesta sísmica para los túneles y puentes .</li> </ul>

Aspectos críticos por atender	A corto plazo para el desarrollo de las actividades de ingeniería conceptual (Aval Técnico y Fiscal – Fase 2)	A mediano plazo para el desarrollo de las actividades de Estudios y Diseños para la Estructuración (Fase 3)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integración de la Línea de Metro con la estación de la Calle 72 que condiciona la metodología de construcción de los túneles en el sector. Dependerá de la configuración del sistema si es Bitunel o Mono Túnel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Con base en el progreso de la exploración geotécnica se irá definiendo el perfil real de los suelos en la zona y la definición del método constructivo correspondiente.</li> </ul>
<b>Interfaces:</b>	Interfaces con: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Avance de la campaña de exploración geotécnica</li> <li>- Conformación de trazado geométrico</li> <li>- Definición de estaciones</li> </ul>	
<b>CAPEX y OPEX</b>	Ver descripción para el entregable 6 más adelante. En la parte de capex y Opex relativo a dicho entregable que hace parte del túnel	
<b>Otros aspectos relevantes:</b>	N/A	

<p><b>Entregables de referencia:</b></p>	<p>Entregable 6- Pre- Prediseño geométrico del trazado . Definición de estructura Metro ferroviarias.</p>
<p><b>Actividades desarrolladas en el marco del estudio de prefactibilidad:</b></p>	<p>Este documento presenta el prediseño geométrico del trazado férreo en planta y perfil, el prediseño de vías, predimensionamiento de obras complementarias y la definición estructural del trazado de la línea 2 del Metro de Bogotá. A continuación se hace un recuento breve de los aspectos más sobresalientes respecto al proyecto de túnel y las soluciones planteadas.</p> <p>El entregable 6 describe la Línea de Metro para Bogotá, indicando que consiste en una infraestructura mixta mediante la incorporación de dos (2) tipologías de metro: subterráneo y elevado, con una longitud de 15.8 km aproximadamente. La línea comprende además una cola de maniobras en su extremo oriental, 11 estaciones y un patio taller, discurriendo por los corredores de la Calle 72, Avenida Ciudad de Cali, reserva vial ALO y la extensión de la Avenida Transversal de Suba. El K0+000 se localiza en la Calle 72 a 60 m al oriente de la Carrera 7, donde se contempla una cola de maniobras en tipología subterránea, la cual alberga la zona para maniobras de retorno, con sus respectivos cambiavías y una zona para parqueo con capacidad para albergar tres trenes, todo ello con el fin de permitir una adecuada operación de la SLMB.</p> <p>Posteriormente, se menciona que al occidente de la Av. Caracas, en el corredor de la Calle 72, se proyecta el primer tramo subterráneo de la SLMB, mediante la construcción de dos túneles, de 7 m de diámetro cada uno, tipología que continúa hasta llegar a la actual reserva de la ALO.</p> <p>El documento hace una presentación de aspectos funcionales y geométricos como son: la velocidad de diseño (de 90 km/h), parámetros en planta y alzado del sistema Metro (Pendiente máxima de 4%, radio de curvatura para velocidad de 90 km/h de 400 m, ancho de vía de 1435 mm, parámetros funcionales, características del material rodante( longitud total máxima del tren( 6 o 7 coches) de 145 m, ancho de tren 2.90 m, altura máxima desde la cabeza del riel al techo del tren de 3.90 m, radio mínimo horizontal de 200 m, radio mínimo vertical de 1000 m, parámetros para el diseño vial urbano, gálibos entre otros.</p> <p>Respecto a las secciones tipo, se indica que será un sistema bitúnel para ser excavado con máquina TBM (Tunnel Boring Machine). Se menciona que se considerarán dos túneles (uno por cada vía), con radio de 3.085m y un espesor de pared de 0.425 m (con un espesor de dovelas prefabricadas de 0.30 m ), para un diámetro de estructura de 7 m , con una separación entre túneles de 7 m.</p> <p>Se menciona que los túneles se ubicarán a 7 m desde la superficie (profundidad de 1 diámetro del túnel), aclarando que de esa forma garantizan un comportamiento estable durante la construcción con TBM. Un esquema general de ubicación de los túneles y de la sección tipo se observa en la Figura 4 y Figura 5 respectivamente:</p>

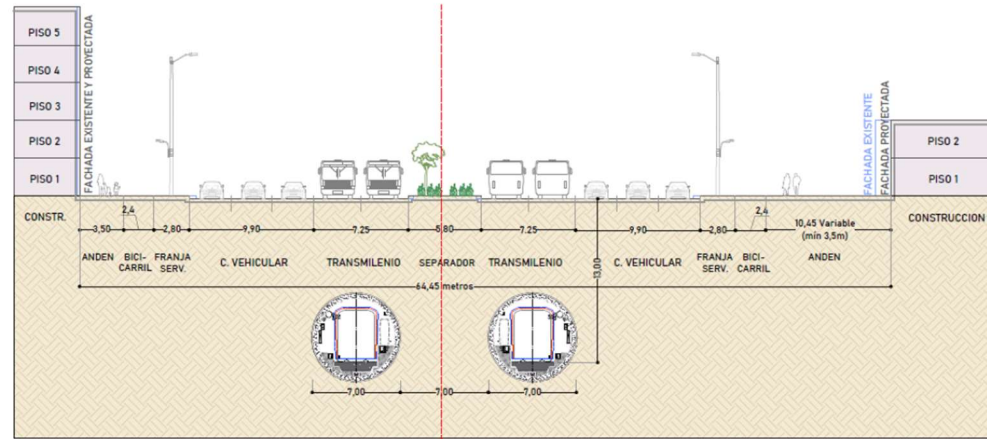


Figura 4. Esquema de ubicación sistema Túnel.- Fuente: Egis-Steer ( 2021)

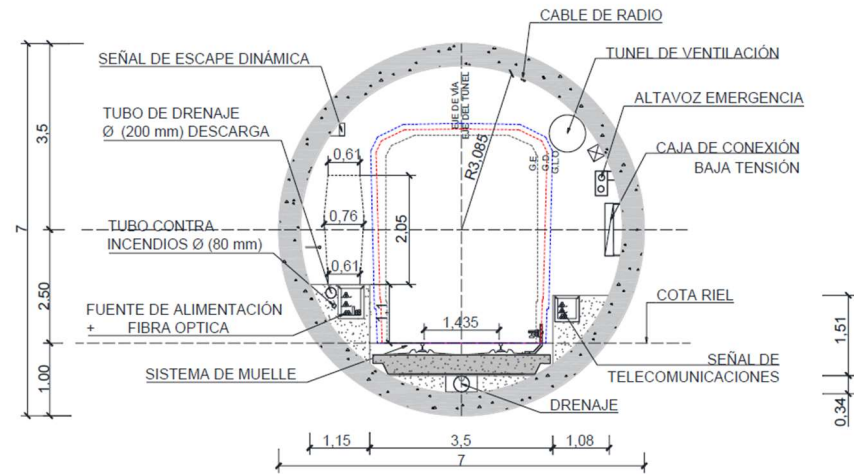


Figura 5. Sección Bitúnel- Egist Steer( 2021)





PK INICIO	PK FIN	TIPO SECCIÓN METRO	MÉTODO CONSTRUCTIVO
00+000	00+791	Túnel entre pantallas	Trinchera cubierta
00+791	12+291	Túnel bi-tubo	TBM
12+291	15+056	Túnel entre pantallas	Trinchera cubierta superficial
15+056	15+760	Viaducto	Vanos prefabricados

Se menciona en la documentación que la Línea inicia en la cola de maniobras, con una longitud de 466 m, dando paso a la estación 1 – “Caracas”, con una distancia de conexión intermodal de 330 m, con la estación terminal o número 16 de la Línea 1 del Metro de Bogotá, producto de la necesidad de no afectar el deprimido proyectado por la Línea 1. Véase Figura 7.



Figura 7. Sector cola de maniobras y Estación No.1 - Fuente: Egis-Steer( 2021)

En la zona de cola de maniobras el estudio de prefactibilidad plantea la excavación de túnel entre pantallas, pero consideran que debe ser revaluado en etapas futuras del proyecto. En las consideraciones de este esquema se tuvo en cuenta el deprimido de la Av. Caracas y el paso de los Bitúneles por debajo de las pantallas de la infraestructura del deprimido. En consecuencia prevén que la cota riel en la Estación 1 se encuentre a una profundidad de 23 m y que en la cola de maniobras finalice a 38 m. Detalle de este aspecto planteado en el estudio de prefactibilidad se muestra en la Figura 8.

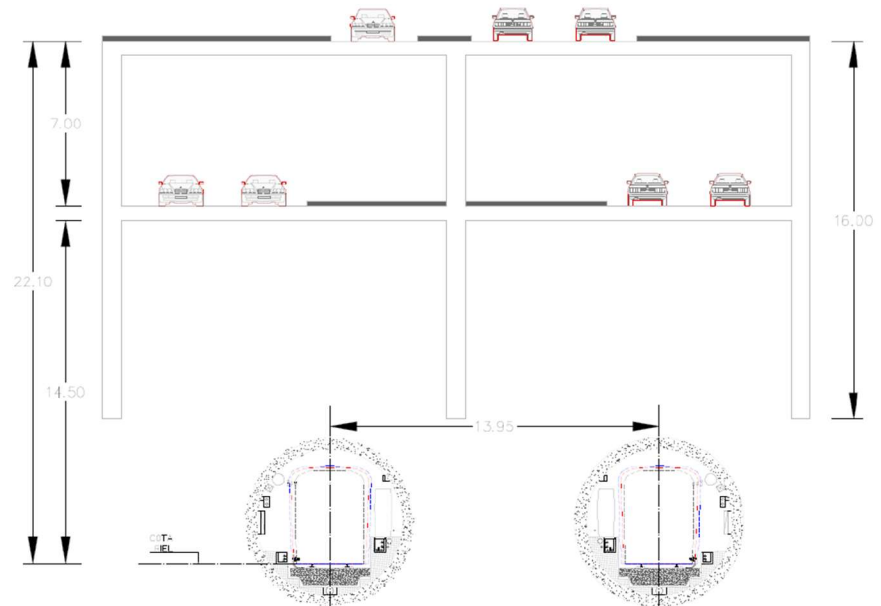


Figura 8. Ubicación opción Bitúnel sector deprimido Av. Caracas- Fuente : Egis - Steer( 2021)

Para el caso de la Calle 72 plantean un perfil V2 de implantación del sistema Metro con Bitúneles, tal como se ilustra en la Figura 9.

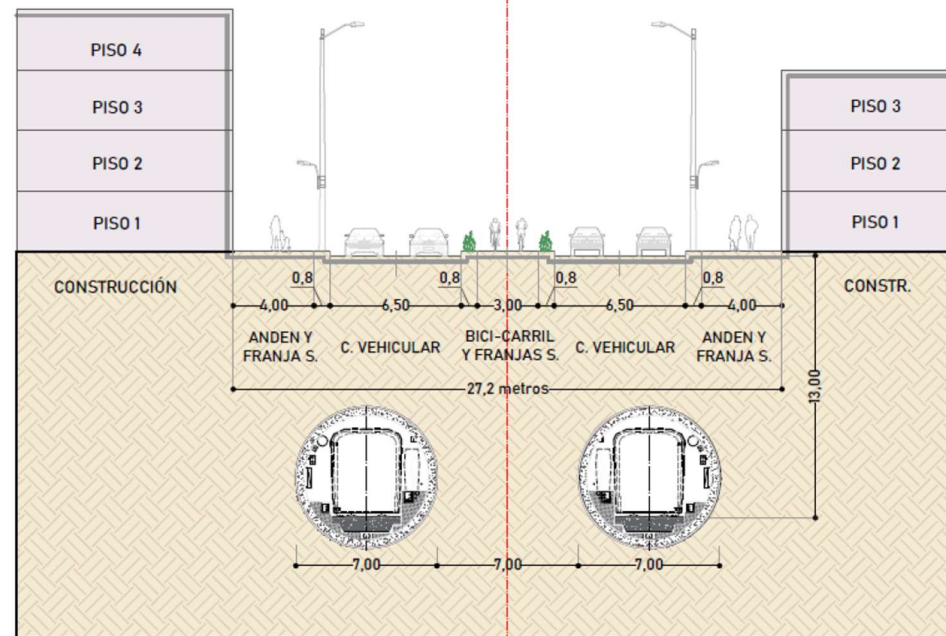


Figura 9. Perfil V2 sistema metro- Fuente: Egis - Steer( 2021)

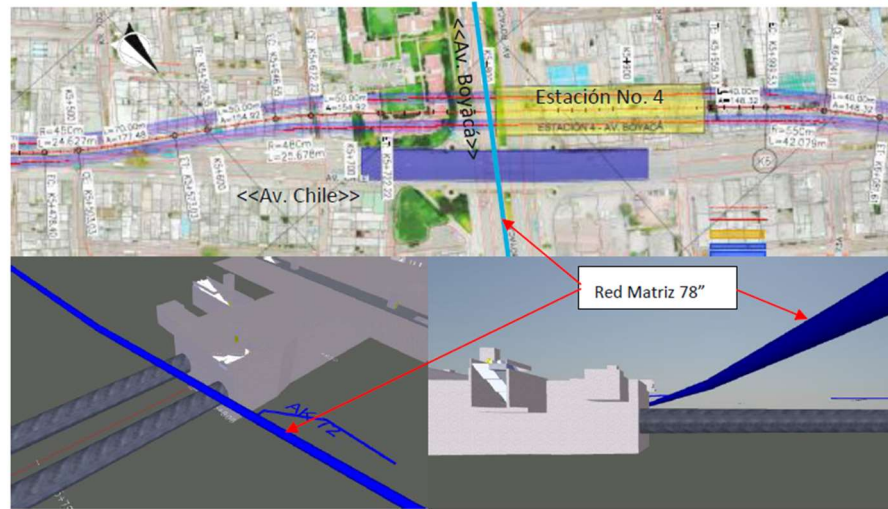
Para el sector de la Calle 72 y hasta la Av. 68, dado el ancho promedio de 27 m en la calle 72, el estudio indica que la implantación del sistema Bitunnel podría tener afectación predial.

Más adelante la Línea Metro pasa por debajo del canal del Rio Arzobispo, donde con la profundidad a la cota riel, prevén un aislamiento o cobertura de 7 m(1 diámetro ). Véase Figura 10.



Figura 10. Paso por debajo del Canal Arzobispo- Fuente: Egis-Steer( 2021)

El informe presenta una problemática para la estación No. 4, donde plantea mover la estación hacia el occidente debido al cruce con la red matriz del acueducto de Tibitoc de 78" de diámetro, o sugiere mover la red de acueducto. Véase Figura 11.



Fuente: Unión Temporal Egis-Steer Metro de Bogotá, 2021

Figura 11. Conducción Acueducto Tibitoc 78" y pasó Línea 2 Metro Bogotá- Fuente: Egis - Steer(2021)

En el tramo 3 - Av. Ciudad de Cali entre calle 80 y Canal Rio Negro, se indica que la línea debe pasar por debajo del canal Salitre con un aislamiento de 7 m entre el túnel y el fondo del canal, según se muestra en la Figura 12:



Figura 12. Paso por debajo del Canal Salitre- Fuente : Egis-Steer ( 2021)

Revisando la información de prefactibilidad por MOVIUS se observa que la cobertura máxima en este sector es del orden de 4 m, en el entendido que esta parte requiere de una revisión profundizando la línea de metro para reducir afectaciones en superficie.

Para la zona del brazo del humedal Juan Amarillo el estudio de prefactibilidad plantea la cota riel definitiva, la que debe ser validada con información del estudio hidrogeológico. En este sector la Línea Metro (con opción Bitúnel ) fue prevista con una cobertura de 12.62 m, tal como se muestra en la Figura 13 y Figura 14 respectivamente.

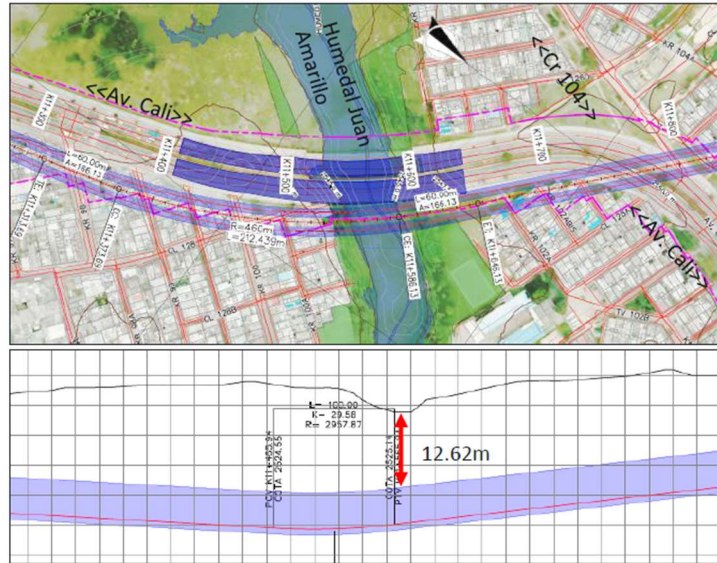


Figura 13. Paso de la Línea Subterránea por debajo del Brazo del Humedal Juan Amarillo- Fuente : Egis Steer(2021)



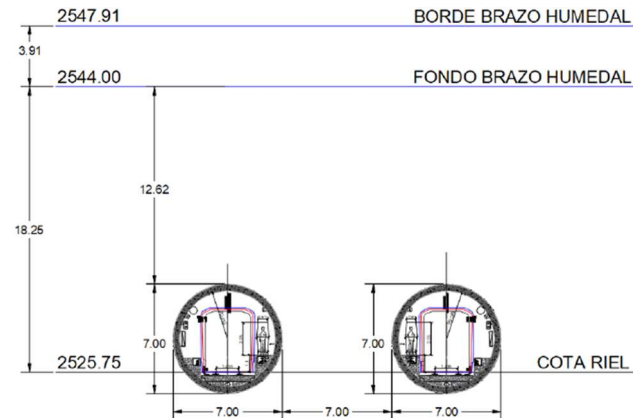


Figura 14. Sección transversal paso opción Bitúnel por debajo o del brazo del Humedal Juan Amarillo-Fuente: Egis- Steer( 2021)

Hacia el tramo 7, se proyectó un sistema férreo mediante un túnel entre pantallas, con una profundidad de la cota riel de 6.0 m bajo la superficie del terreno existente, tal como se muestra en la Figura 15:

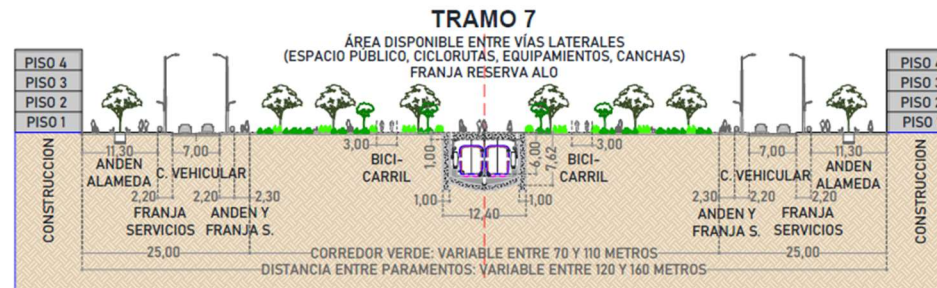
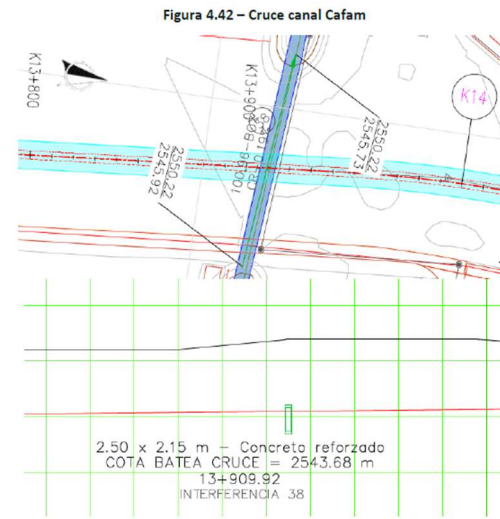


Figura 15. Sección típica soterrada en el tramo 7- Fuente: Egis - Steer(2021)

En este sector del tramo 7, el estudio de prefactibilidad planteó elevar la cota riel en 2 m, facilitado la construcción de la estructura del túnel soterrado, e indicaron que esto permitiría solucionar varios cruces de redes de aguas lluvias de una forma más económica, ya que se abre la posibilidad de desarrollo del drenaje por gravedad en las redes existentes que cruzan la infraestructura, a lo que plantean como ejemplo el Canal Cafam. Véase Figura 16:





Fuente: Unión Temporal Egis-Steer Metro de Bogotá, 2021

Figura 16. Paso por la zona del Canal Cafam - Fuente : Egis Steer(2021)

Para las alternativas de trazado de la L2MB en la calle 72, el estudio de prefactibilidad plantea dos alternativas: la primera sin afectar la obra proyectada por la Línea 1 del Metro (PLMB), para lo cual establecen un esquema como el indicado en la Figura 17 y Figura 18 respectivamente.

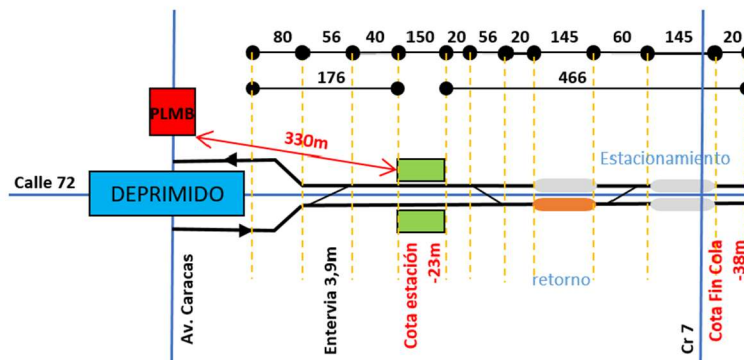
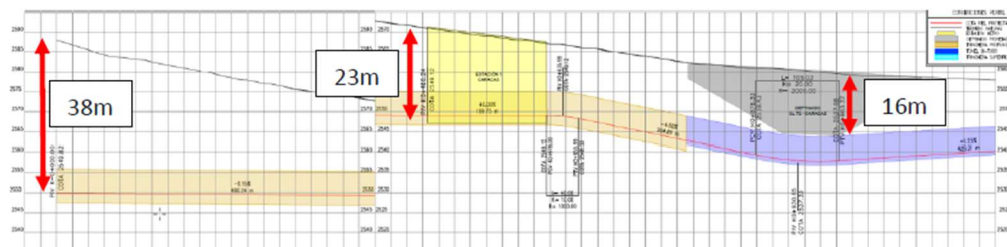


Figura 17. Alternativa 1 propuesta en la zona de cola de maniobras- Fuente: Egis Steer(2021)



Fuente: Unión Temporal Egis-Steer Metro de Bogotá, 2021

Figura 18. Perfil solución propuesta en la zona de cola de maniobras y pasó debajo del deprimido Av. Caracas- Fuente: Egis - Steer

En esta alternativa en total se requiere una cola de maniobra de 466.0 m, que según el informe de prefactibilidad indica que se puede construir con un túnel mediante métodos convencionales, dependiendo del tipo de suelo y el nivel freático o por medio de una trinchera abierta, que es el método propuesto en esta etapa del proyecto.

La segunda alternativa corresponde con afectación de la infraestructura proyectada PLMB, donde la Estación No.1 quedaría bajo el deprimido previsto por la PMLB, tal como se muestra en la Figura 19:

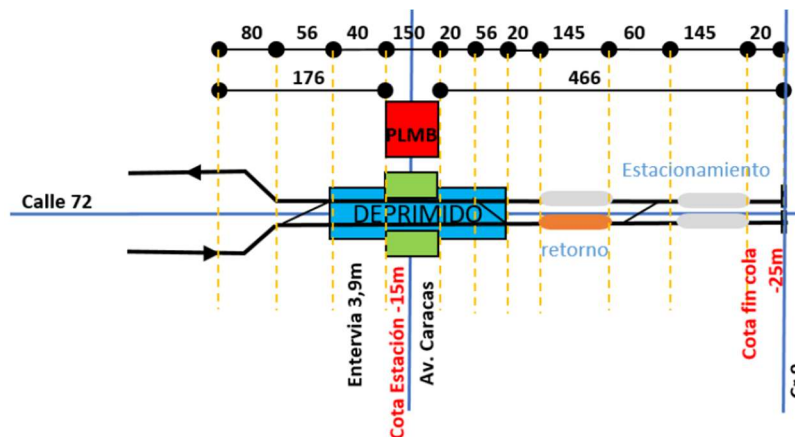


Figura 19. Alternativa 2 propuesta en la zona de cola de maniobras- Fuente: Egis Steer( 2021)

Según el estudio de prefactibilidad recomienda estudiar esta opción, debido a que facilita la conexión entre pasajeros con menor impacto de la cola de maniobras, pero requiere realizar ajustes a los diseños del proyecto deprimido por el Concesionario de la PLMB-T1.

Definen varios condicionantes para el estudio de la línea metro como son; geológico, geotécnico, hidrogeológico, entorno urbano y puntos duros. En relación con el ámbito geológico se indica que el proyecto se ubica en una zona de riesgo sísmico intermedio según la NSR-10 en su capítulo A.2. Por otra parte se menciona que desde el punto de vista geotécnico la zona se caracteriza por disponer de terrenos con zonas homogéneas donde se esperan suelos blandos (arcillas, limos y arenas), localmente con lentejones o bandos de turbas de poco espesor y extensión lateral limitada. Desde el punto de vista de condicionante hidrogeológico se menciona que la zona se caracteriza por un nivel freático alto con oscilaciones de nivel importantes a lo largo del trazado planteado. En relación con puntos duros se menciona que se identifican varios puentes carreteros con cimentaciones profundas (pilotes entre 20 m y 80 m de profundidad); el giro de 90° del trazado de Av. Calle 72 hacia la Av. Carrera 86, la ubicación de estaciones seleccionada por criterios de transporte, la franja de la ALO, y la consideración de zona inundable en el trecho final.

El entregable 6, plantea los tipos de obras subterráneas definidos como: a) trinchera cubierta para ser aplicada en la franja de la ALO y transiciones, estaciones y en la cola de maniobras, b) túnel con tuneladora para la línea de Metro con la utilización de máquina presurizada (Tipo EPB), c) túnel minero, el cual requiere tratamiento del terreno y limitado a las conexiones localizadas. Para el tema de trinchera se indica que se requerirá de soportes del terreno y evacuación de aguas de la zona de obras. En el caso del túnel con tuneladora EPB menciona que puede ser viable un solo túnel ( Mono Túnel) de diámetro aproximado de 10 m, o doble túnel (Bitúnel) de 7 m de diámetro aproximadamente cada uno.

El Entregable 6 indica que dada la complejidad del sistema de sistema subterráneo, se aplicó una metodología de estudio multicriterio para la selección de un monotubo o un bitubo, teniendo en cuenta varios elementos diferenciadores entre ambas tipologías. Como elementos diferenciadores, el estudio de prefactibilidad definió los siguientes: a) Obra Civil / Estructuras subterráneas, Plan de Obras, c) Estaciones, d) Explotación comercial del sistema Metro, e) Riesgos de construcción, f) Evacuación

de Emergencia y g) Compra de predios. Una vez identificados los elementos diferenciadores, se asignó un factor de relevancia o de peso para cada elemento o subcategoría. La relevancia o peso de cada elemento le fue asignado con un valor entre 1 y 3. La suma de todos los pesos y, en consecuencia, la evaluación máxima fue de 30 puntos al contar con 10 categorías o elementos evaluados. La determinación de los elementos y de sus relevancias, así como la evaluación se realizó por un grupo de expertos. Los valores de evaluación se normalizaron en una escala de 0 a 1, siendo el 1 el valor más favorable. Los criterios y subcriterios utilizados por el estudio de prefactibilidad para definir cuál sería la opción o sistema más viable, se indican en la siguiente tabla:

Tabla 2. Criterios y subcriterios definidos para analizar la opción Bitúnel versus Mono túnel.

Obra Civil/ Estructuras Subterráneas	Plan de Obras	Estaciones	Explotación del Metro	Riesgos de Construc ción	Evacuación de emergencia	Adquisición predial
-Volumen excavado (m <sup>3</sup> /m) -Espesor recomendado de los segmentos (cm) -Concreto para segmentos -Concreto para relleno (fundación de las vías) -Radio de giro de la tuneladora TBM -Diseño de la tuneladora TBM -Logística requerida para la operación de la tuneladora TBM -Evacuación de emergencia	-Frentes de obra de las tuneladoras. Estructuras auxiliares -Colocación de la vía férrea -Instalación de sistemas para la operación del túnel	-Tipo de andén o plataforma (laterales o centrales) -Tipo de Estructura -Ancho -Profundidad - Instalaciones mecánicas, eléctricas y fontanería (MEP)	-Estaciones, costos de operación y mantenimiento (OPEX) -Operación en modo degradado	-Frente mixto de obra de las tuneladoras. -Ancho de la cubeta de subsidencia regional - Profundidad de la cubeta de subsidencia regional	-Desplazamiento hasta un lugar seguro -Zona de evacuación	-Ancho de la servidumbre subterránea -Adquisición y ocupación de predios -Ocupación temporal de predios

El estudio aclara que algunos de los parámetros evaluados son objetivos (medibles) y otros son más bien de evaluación subjetiva y la relevancia o el peso relativo de los parámetros se basó en la experiencia obtenida en proyectos de condicionantes similares. Realizada la valoración de la matriz multicriterio, el estudio de prefactibilidad presenta los siguientes valores:

Tabla 3. Valores de la matriz de análisis Multicriterio según la prefactibilidad

Criterio	Relevancia	Túnel Ø10m	2 túneles Ø 7m
CIVIL / ESTRUCTURAS SUBTERRANEAS	7,00	5,50	6,40
PLAN DE OBRAS	5,00	4,30	4,30
ESTACIONES SUBTERRANEAS	5,00	2,90	5,00
EXPLOTACIÓN COMERCIAL DE METRO	3,00	2,50	2,90
RIESGOS CONSTRUCTIVOS	5,00	3,80	4,30
EVACUACIÓN DE EMERGENCIA	2,00	1,50	2,00
ADQUISICIÓN PREDIAL	3,00	2,50	2,20
<b>TOTAL</b>	<b>30,00</b>	<b>23,00</b>	<b>27,10</b>

Fuente: Egis- Steer( 2021)

Esta valorización fue luego revisada y ajustada por EMB incluyendo más criterios y subcriterios y realizando una análisis de Saaty, como un análisis de sensibilidad de los subcriterios, buscando reducir la subjetividad del análisis. Los resultados de esa matriz de análisis multicriterio se presentan en la Figura 20.

	<b>Monotubo. 4.17</b>	<b>Bitubo. 4.52</b>
<p>Con lo anterior se puede establecer que la <b>tipología Bitubo tiene mayores ventajas para el proyecto</b>, según los criterios y subcriterios integrados para la evaluación. En el siguiente numeral se presenta un análisis de sensibilidad para evaluar la confiabilidad de los resultados.</p>		
<p><b>4.3. Análisis de sensibilidad</b></p> <p>Para evaluar la sensibilidad de los resultados, se establecieron 3 diferentes escenarios y en cada uno de ellos se varían las relevancias de cada Criterio y Subcriterio; en total se obtuvieron 11 resultados diferentes, los cuales se presentan a continuación:</p>		
<p><b>Escenario 1:</b> tomando como base la matriz de resultados de la Tabla 13, se varía:</p>		
	<b>Monotubo</b>	<b>Bitubo</b>
Misma relevancia para Criterios	4.26	<b>4.53</b>
Misma relevancia para Subcriterios	4.29	<b>4.51</b>
Misma relevancia para Criterios y Subcriterios	4.36	<b>4.50</b>
<p><b>Escenario 2:</b> de los datos base presentados en la Tabla 13, <u>se eliminan las menores Clasificaciones para cada tipología</u> y se varía:</p>		
	<b>Monotubo</b>	<b>Bitubo</b>
Relevancias base (Tabla 13)	4.59	<b>4.67</b>
Misma relevancia para Criterios	4.71	<b>4.73</b>
Misma relevancia para Subcriterios	4.64	<b>4.71</b>
Misma relevancia para Criterios y Subcriterios	<b>4.74</b>	<b>4.74</b>

Figura 20. Valorizaciones análisis Multicriterios según EMB: Fuente: EMB( 2021)

El informe de prefactibilidad si bien indica que las dos tipologías de infraestructura subterránea estudiadas propuestas son perfectamente válidas, finalmente establecen que la tipología de Bitubo es, para este caso, la propuesta que reúne más ventajas y, por lo tanto, es la solución recomendada. Conclusión ratificada en el estudio de EMB.

Finalmente esta parte relativa al sistema subterráneo termina indicando que se pueden esperar rendimientos de excavación entre 400 y 500 m/mes (al ser los materiales muy homogéneos, se podrá esperar que un contratista experimentado con las condiciones geotécnicas, obtenga rendimientos muy superiores de 800 a 1000 m/mes o aún mejores), lo que se traduce en que la duración de las operaciones de excavación sea entre 28 meses y 35 meses.

Para efectos de programación establecen que la operación de las tuneladoras tendrá un ligero desfase para evitar que los escudos de las máquinas estén uno al lado del otro, por lo que estas deben estar suficientemente espaciadas, por lo que plantean que se requiere de dos meses entre el arranque de excavación de las tuneladoras.

Al final de la cola de maniobra, se hace necesario la construcción de un pozo de salida, el cual será tan pequeño como las partes de la tuneladora así lo permita.

El tramo de la cola de maniobras sería un túnel somero construido en trinchera cubierta (Cut & Cover), donde la estación No. 1, se desarrolla en tres niveles bajo superficie. Véase siguiente figura:

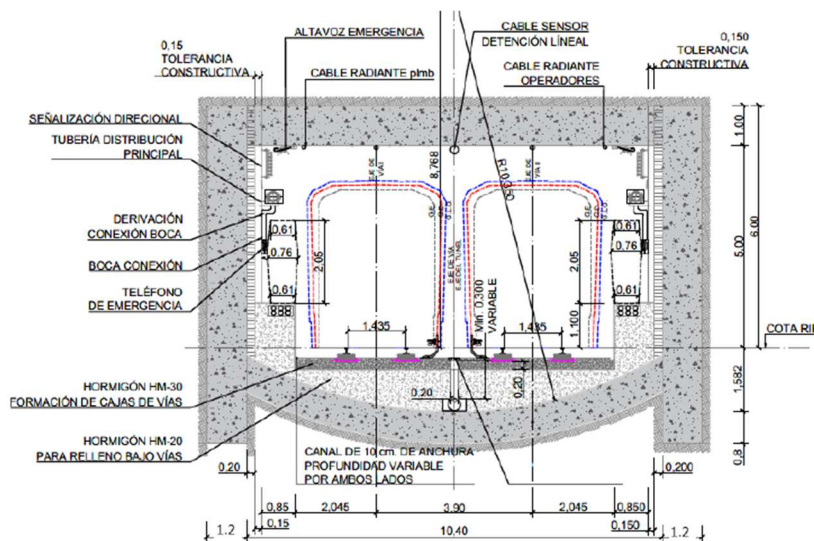


Figura 21. Sección Tipo Túnel entre pantallas zona cola maniobras según prefactibilidad- Fuente: Egis - Steer( 2021)

**Conclusiones del estudio de prefactibilidad:**

- Se indica que para el tramo bajo la avenidas Calle 72, Carrera 86 y Calle 127 están previstos como una tipología subterránea, recomendando un doble túnel o Bitubo, con vías férreas únicas direccionales. Esta recomendación está basada en un estudio multicriterio que analizó en detalle siete categorías: Civil / Estructuras, Plan de Obras, Estaciones, Explotación comercial de Metro, Riesgos constructivos, Evacuación de Emergencia y Adquisición predial, dando como resultado una cierta ventaja del bitubo sobre el monotubo.
- Establecen un sistema con Bitúnel de 7 m de diámetro externo, separados a 7 m entre paredes externas.
- Establecen que los túneles serán ubicados a 7 m desde la superficie a la clave y de 13 m a la cota de riel.
- Sobre el tramo de la ALO, la prefactibilidad recomienda la construcción de un túnel en trinchera cubierta (Cut & Cover), considerando que no se prevén riesgos generados por la construcción del túnel al disponer de una franja amplia sin edificios o líneas de servicios de agua potable de importancia.

- Proponen debido a la infraestructura proyectada para el deprimido de la AV. Caracas y estación No.16 del PLMB, una solución de túnel somero construido con Trinchera cubierta (Cut & Cover), en la zona de la cola de maniobras, reduciendo la longitud de la cola, donde la estación No. 1 se desarrollaría en tres niveles bajo superficie con la menor profundidad que permite la geometría de este tramo.
- Recomiendan puntualmente el ajuste a los diseños del deprimido proyectado, permitiendo la implantación de la estación No. 1, en la intersección de la Calle 72 con Av. Caracas, mejorando la integración con la PLMB, reduciendo la profundidad de la cota riel en este punto, indicando que como consecuencia se tendrá menor profundidad de la cola de maniobras con menores afectaciones sociales económicas.
- Para la construcción de túneles con TBM, recomiendan que el recubrimiento mínimo sea de una vez el diámetro del túnel y como máximo dos veces el diámetro.
- Se indica que se debe estudiar el cruce del corredor férreo con la línea de conducción de agua potable Tibitoc de 78" en la Calle 72 con Av. Boyaca, evaluando la factibilidad de desviar dicha red e implantar la estación No. 4 al oriente de su ubicación propuesta.
- En el paso del sistema férreo por el brazo del humedal Juan Amarillo indican que la cota riel debe ser validada con información proveniente de un estudio hidrogeológico.
- Se recomienda realizar estudios detallados para el paso del sistema férreo bajo canales existentes, teniendo en cuenta las condiciones de estos cuerpos de agua con la exploraciones geotécnicas y analizar los aislamientos mínimos que debe tener el túnel con respecto al fondo de esos canales.
- Se indica que las dos tipologías de infraestructura subterránea estudiadas propuestas son perfectamente válidas (túnel Monotubo y túnel Bitubo). No obstante, se indica que la tipología Bitubo reúne más ventajas según el análisis multicriterio, por lo que la dan como solución recomendada.

Comentarios de MOVIUS al estudio:

- Se plantea como solución un sistema Bitunel de 7 m, con dovelas de 0.30 m de espesor. No obstante, para darle total validez a esta solución es necesario revisar dicha solución a la luz de los tipos de materiales que serán cruzados por la Línea Metro, teniendo en cuenta la interacción entre estos túneles y sus repercusiones en superficie por estar ubicado a menor profundidad que la opción Mono túnel.
- Si bien la información de prefactibilidad presenta que el soporte de la solución Bitunel será con dovelas de 0.30 m de espesor, es necesario revisar dicho espesor de dovela para confirmar que es capaz de asimilar los esfuerzos a los que será sometidos los túneles (por sobrecargas, presiones de agua, del terreno, eventos sísmicos, fuego, cargas de transferencia de fuerzas sobre el anillo a lo largo de las juntas longitudinales y transversales, peso propio, etc), aspecto que se llevará a cabo en la fase actual de diseños de factibilidad.
- El estudio de prefactibilidad deja claro que la implantación de un perfil vial V2 a lo largo de la calle 72, existirán afectaciones prediales con varios sitios críticos, en los cuales, la sección de ancho de 27.2m es mayor que el ancho actual existente de 26.7 m (p.e entre la Av. Caracas y NQS), como de 23.6 m (entre la NQS y la carrera 68). La opción Bitunel impactaría en mayor grado este sector por ser una solución más superficial que una Monotubo y por tener estaciones cuyos anchos sobrepasan el corredor existente, impactando las estructuras y/o las cimentaciones de estas construcciones. Este aspecto será estudiado como parte de la información para el aval técnico.
- El trazado plantea pasar por debajo del canal Arzobispo a una profundidad de 7 m, aspecto que si bien no está analizado en la prefactibilidad será necesario analizarlo al menos preliminarmente con los asentamientos para cualquier de las soluciones ya sea mono o bitunel que se planteen y así definir si es necesario realizar pretratamientos desde superficie para mitigar los impactos de subsidencia.
- Otro análisis que se identifica debe ser llevado a cabo es el impacto que podría causar la solución Bitunel (siendo más superficial, tal como lo establecen a 1 diámetro, es decir 7 m), o mono túnel (pasando más profundo) por debajo de la red matriz del acueducto de Tibitoc de 78" en la zona de la Calle 72 con A. Boyacá.



- Dado que se detecta que el paso de la Línea de Metro por debajo del canal Salitre está a menos profundidad de los 7 m( se midieron 4 m con la información revisada de los planos de la prefactibilidad), se considera conveniente analizar este punto crítico para el aval técnico en cualquiera de las soluciones Bitúnel o Mono túnel que se escoja. En ambos casos se considera que cualquier cobertura menor a 1 Diámetro podría impactar la estructura del canal, aspecto que se revisará para el aval técnico.
- En la zona del brazo del Humedal Juan Amarillo, el estudio de prefactibilidad asume como cobertura 12.62 m, es decir aproximadamente a 1.8 veces el diámetro del Bitúnel. No obstante en esta zona se tendrá que realizar un análisis al menos preliminar que justifique la profundidad de implantación de cualquiera de las opciones y los efectos en superficie.
- El trazado previsto en la prefactibilidad en el tramo 7, plantea una sección soterrada con sistema Cut & Cover en la zona de la ALO, lo cual interfiere con el trazado del canal existente Cafam. En esta zona MOVIUS planteará soluciones con miras a optimizar los trabajos, evitar las interferencias, reducir costos y tiempos.
- En la zona de la cola de maniobras los estudios previos propone un túnel entre pantallas (Cut & Cover) que tendrá profundidades de 23 a 38 m y una larga extensión en longitud, en la zona de la Calle 72, donde existen grandes edificaciones y donde está obra profunda podría impactar el sector, tanto geotécnicamente como en la parte predial, y afectación del tráfico y social. Esta parte que luego fue revisada por la EMB, planteando la construcción de la cola de maniobras con un túnel convencional, será también analizado buscando reducir los impactos en superficie, los costos y tiempos.
- La recomendación de ubicar los túneles con sistema TBM (tal como es mencionado en el estudio de prefactibilidad), plantea un recubrimiento mínimo de una vez el diámetro del túnel y como máximo de dos veces el diámetro, aspecto que tendrá que ser analizado en más detalle para el aval técnico.
- Se indica que la tipología de trinchera cubierta requerirá de soportes del terreno y de evacuación de aguas de la zona de obras. El sistema que debe ser aplicado es el Cut & Cover (metodo invertido), con miras a; reducir la afectación en superficie ( p.e interrupción de tráfico y afectaciones a predios sociales), por un lado, y debe evitarse la salida de agua durante la construcción, para evitar asentamientos y daños a las edificaciones y servicios existentes en inmediaciones a estas obras.
- Se indica que es factible la construcción del túnel en línea utilizando el tipo de tuneladora presurizada de equilibrio de presión de tierras( EPB). Está recomendación dada en los estudios previos es correcta, pero debe ser revisada en mayor detalle a la luz que vayan apareciendo con el plan de exploraciones geotécnicas analizando los requerimientos técnicos mínimos del tipo de la máquina. Dado que no hay en la información consultada esquemas de las soluciones geotécnicas para el paso en los puntos críticos ( p.e canales o cuerpos de agua, zonas con presencia de turbas y gases, pasó en la zona del deprimido, presencia de materiales mixtos), esto será analizado y esquematizado para el aval técnico..
- Si bien la información de prefactibilidad esboza someramente el tema pozos de recepción y salida, será necesario dar un dimensionamiento en planta y en profundidad, así como aspectos relativos a información que permita validar este aspecto dentro de la factibilidad.
- Se tienen algunos comentarios al análisis multicriterio que fue aplicado para definir como solución viable el sistema Bitúnel tanto en la prefactibilidad como luego complementado por la EMB (Empresa Metro de Bogotá), cuya parte es presentada más adelante en este reporte en los aspectos relevantes de la debida diligencia.

Ítem	Aspectos relevantes	¿Cómo atenderlos en el marco de la asesoría técnica?
------	---------------------	--

<p><b>Secciones tipo. Numeral 3.20 pg 17.</b></p>	<p>Sistema Bitúnel versus Mono túnel</p>	<p>-Revisión de casos en la región como a nivel internacional, analizando ventajas y desventajas</p> <p>- Revisando en costos y tiempos la obra civil la solución bitunnel versus Mono túnel.</p>
<p><b>Espesor de Dovelas . Numeral 3.20- Pg 17</b></p>	<p>Se indica que el espesor de dovela para un túnel de diámetro de 7 m será de 0.30 m</p>	<p>-Se revisará el espesor de dovelas para la solución que se adopte Mono túnel o Bitúnel.</p>
<p><b>Normas o referencias aplicables</b></p>	<p>Ver numeral 1 de está parte del proyecto de Túnel</p>	<p>Se aplicarán estas normas o guías para el diseño del túnel como de las dovelas.</p> <p>Adicionalmente se aplicarán las normas, guías de diseño y referencias indicadas en el numeral 1 para el Proyecto de Túnel.</p>
<p><b>Dimensionamiento de las secciones y tramos subterráneos y soterrados</b></p>	<p>Verificación de dimensiones de la sección del túnel como de las secciones soterradas.</p>	<p>Se revisará con base en la definición si es solución Bitúnel o Mono túnel.</p>
<p><b>Solución en el sector de la Calle 72 arriba de la Av. Caracas y sector cola de maniobras - Deprimido de la Av. caracas - Numerales 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 Y 4.13 - pg 23 a 27</b></p>	<p>Establecer el esquema que más se adapte para resolver el paso debajo del deprimido, la construcción de la Estación 1, la cola de maniobras y el pozo de salida de la tuneladora.</p>	<p>La solución dependerá en parte de la definición de si será un sistema Monotubo o Bitubo para pasar bajo el deprimido de la PLMB previsto. Igualmente se tendrá en cuenta la respuesta al interrogante de la preferencia de la ubicación de estación No.1 por parte de la alcaldía de Bogotá y por otra la caracterización geologica- geotecnica de los materiales del subsuelo que se logre establecer en la zona con el avance de las exploraciones geotécnicas, serán los condicionantes para definir la profundidad de implante de la solución y el acondicionamiento y ubicación de la Estación No. 1, la cola de maniobras y el pozo de salida.</p>

<p><b>Implantación Línea metro en la calle 72. Numeral 4.16 - Pg 29</b></p>	<p>Implantación de la Línea Metro según la opción Bitúnel en la calle 72 .</p>	<p>-Con base en mediciones topográficas y revisando la tipología del sistema Bitúnel o Monotúnel, así como el dimensionamiento de las estaciones , se revisará si existe afectación o no de tipo predial, como de efecto de asentamientos en las edificaciones vecinas existentes.</p>
<p><b>Paso por debajo del Canal Arzobispo-4.21- Pg 30</b></p>	<p>-Realización de un estudio topográfico que permita corroborar las cotas del fondo del canal, sumado al desarrollo de exploraciones geotécnicas que permitan detallar los aislamientos requeridos del túnel Bi-tubo respecto a este cuerpo de agua.</p>	<p>-Se verificará las condiciones topográficas y con base en las exploraciones geotécnicas se definirá la estratigrafía y los parametros geotécnicos, como la posición del nivel freático, con miras a establecer el aislamiento mínimo requerido en está zona. Este análisis dependerá de la solución final que se adopte de Bitúnel o Mono túnel.</p>
<p><b>Paso por debajo del canal Salitre -4.32 - Pg 35</b></p>	<p>-Revisión del trazado en alzado para la línea Metro en la zona de cruce por debajo del canal Salitre, el cual en el estudio de prefactibilidad ha sido sugerido a 7 m de cobertura.</p>	<p>-La magnitud de los asientos depende de la configuración Bitúnel o Mono túnel y de la profundidad a la cual se implante dicha solución. Este aspecto será revisado y analizado buscando la cota que reduzca el impacto. Para esto se revisarán las condiciones topográficas de la zona, el resultado de las exploraciones y se aplicarán tanto análisis con métodos analíticos y numéricos en 3D que permitan validar la cota de implantación más segura del sistema.</p>
<p><b>Paso por debajo del Brazo del Humedal Juan Amarillo</b></p>	<p>-Ajuste de profundidad con base en levantamiento topográfico y el estudio hidrogeológico.</p>	<p>- Se revisarán las condiciones topográficas, la caracterización geológica- geotecnica e hidrogeológica de la zona. Se realizaron análisis analíticos y numéricos 3D con miras a obtener la cota más conveniente para reducir los impactos en este cuerpo de agua. Es posible que se requieran algunos pretratamientos para reducir el impacto en está zona. Para el paso del sistema metro subterráneo por debajo del humedal Juan Amarillo y con base en la información técnica (diseños), se describirán, a nivel de factibilidad, las técnicas constructivas, el equipo (compuesto por una tuneladora tipo EPBS) y el proceso de excavación y avance. El tipo de soporte estará conformado por dovelas prefabricadas de concreto reforzado. En el caso de los pozos, se aplicará la excavación con pantallas preexcavadas de concreto reforzado o muros tipo Milán. La excavación (ya sea en Mono túnel o Bitúnel) será ejecutada con máquina EPB (Earth Pressure Balance). Esta máquina está compuesta por un escudo cerrado, con una cámara donde se aplica presión de agua y tierra en el frente, balanceada con el fin de controlar los desplazamientos. El efecto de soporte y balance de presiones se logra con el material de la excavación, el cual es mezclado con agua o aditivos</p>

		<p>condicionantes dependiendo del tipo de material por excavar, para formar un lodo de consistencia suave a muy suave, que es retirado a través del tornillo sin fin, ubicado detrás de la cámara y la cabeza cortadora, para luego ser evacuado hasta la zona de depósito. Detrás del escudo se van instalando dovelas prefabricadas de concreto reforzado. El “gap” que deja la cabeza cortadora se rellena con inyecciones de lechada para reducir el efecto de desplazamiento y, en consecuencia, la subsidencia. Las presiones, mezclas y tipos de inyección serán definidas durante la etapa de diseño.</p> <p>Se analizarán los riesgos geológico-geotécnicos, y se buscará que el método constructivo logre un contrabalance de presiones del terreno y de las aguas, manteniendo hermeticidad con los escudos de la máquina y evitando que se afecte el nivel freático, el desecamiento de fuentes hídricas superficiales, y los riesgos asociados.</p> <p>En el análisis del método constructivo con máquina EPB bajo el brazo del humedal, se revisará el efecto de los fluidos de presurización del frente para garantizar la estabilidad y las eventuales implicaciones ambientales de estos fluidos que sean necesarios dependiendo de las características de los materiales a atravesar.</p>
<p><b>Tramo 7 - sector de túnel entre pantallas sección soterrada- numeral 4.44 Pg 42</b></p>	<p>-Verificación de la solución soterrada en la ALO con Cut &amp; Cover en especial en el cruce del canal Cafam.</p>	<p>-Revisión del trazado de la Línea Metro, ajustando el posicionamiento del eje el alzado y adoptando una solución Mono túnel para pasar más profundamente sin afectar el canal.</p>
<p><b>Estudio Multicriterio- Numerales 9.19 a 9.65- pg 69 a 75.</b></p>	<p>-Se requiere revisar el estudio de elección del sistema Mono Túnel versus Bitúnel</p>	<p>Se revisarán los conceptos emitidos con los cuales se llega a favorecer la opción Bitúnel en vez de la Mono túnel. Para esto se considera conveniente valorar en términos de cantidades de obra, costos y tiempos las dos opciones en los conceptos de mayor peso y así eliminar el grado de subjetividad que tiene el análisis presentado en la prefactibilidad como el ajustado EMB.</p>

Aspectos críticos por atender	A corto plazo para el desarrollo de las actividades de ingeniería conceptual (Aval Técnico y Fiscal – Fase 2)	A mediano plazo para el desarrollo de las actividades de Estudios y Diseños para la Estructuración (Fase 3)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensionamiento de la sección, espesor de dovelas y posición vertical .</li> <li>- Posicionamiento en planta y alzado de la línea con miras a optimizar y reducir costos y tiempos</li> <li>- Estimación de asentamientos y ancho de cubeta de asientos en zonas críticas, como en zonas con edificaciones altas como es el caso de la Calle 72.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presencia de gas metano en mantos de turbas que puedan ser identificadas en las exploraciones</li> <li>- Revisión del proceso constructivo con máquina EPB o SPB o mixta en la zona de cola de maniobras con materiales mixtos de gravas, bolos y arcillas p.e sector oriental arriba de la Carrera 9 con calle 72</li> </ul>
<b>Interfaces:</b>	Interfaces con: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Exploraciones Geotécnicas</li> <li>- Definición trazado Línea metro en planta y alzado</li> <li>- Estaciones</li> <li>- Definición en el sector de cola de maniobras y deprimido de la Av. Caracas</li> </ul>	
<b>CAPEX y OPEX</b>	En el capex y opex son presentados en el Entregable 11 de la prefactibilidad. En ese reporte se establecen los siguientes criterios para la evaluación: <ul style="list-style-type: none"> <li>● Túnel (bitúnel) con TBM de 10,45 km conformado por una sección de 2 túneles de 7 metros de diámetro cada uno.</li> <li>● Para el indicador de costos de la excavación subterránea mediante el proceso TBM, la prefactibilidad en el entregable 11 indica que se tuvo en cuenta, la adquisición, construcción, transporte, y ensamblaje de dos tuneladoras, la implantación y funcionamiento de dos áreas logísticas para las instalaciones y ocho pozos de lanzamiento y el desensamble de las tuneladoras. También menciona que se tuvieron en cuenta los costos de excavación, sostenimiento, impermeabilización, anclajes y revestimiento de las excavaciones, junto con las fundaciones de la vía; valorados a partir de los estudios conceptuales de proyectos con condiciones similares ejecutados en Asia, tales como los metros de Singapur y Macao.</li> <li>● Trinchera entre pantallas profundas, de los cuales 466 m corresponden a la cola de maniobra y 324 m al tramo que conecta al túnel bitubo</li> </ul>	

- Trinchera entre pantallas poco profundas de 2,76 km de largo en la Avenida Longitudinal de Occidente - ALO, con profundidades entre 5 y 10 m, en la cual se proyectan las estaciones N° 9 y 10 semienterradas.
- Presupuesto a diciembre de 2020 y adoptaron un factor de incertidumbre del 10 %, el cual mencionan que se justifica por el nivel de asertividad de los estudios basados en información secundaria extraída de estudios de proyectos en nivel de factibilidad realizados en la ciudad de Bogotá.
- Un valor de A.I.U del orden de 25:8% para la obra civil y del orden de 19.4% para el sistema ferroviario y material rodante. Además de un 19% de IVA.

Respecto al tema de Capex y Opex, se indica que la definición de la tipología del túnel (Monotubo-Bitubo) tendrá relación directa con CAPEX/OPEX del proyecto y constituirá un elemento necesario para el aval técnico.

**Otros aspectos relevantes:**

**1. ALTERNATIVAS PARA EL TRAMO: PASO AV. CARACAS, POZO DE LANZAMIENTO/RECEPCIÓN, ESTACIÓN 1 Y COLA DE MANIOBRAS-PROYECTO DE TÚNEL.**

Este documento elaborado por la EMB presenta alternativas (preliminares) evaluadas para la construcción del tramo del proyecto de la Segunda Línea del Metro de Bogotá (SLMB) en la calle 72, al oriente de la Av. Caracas.

Se menciona que el estudio de la prefactibilidad propone la construcción de trincheras en el tramo entre el Pozo de recepción de la tuneladora y el final de la Cola de maniobras; utilizando pantallas pre-excavadas, cuya profundidad fue prevista de ~25m y ~40 m, aumentando a medida que el trazado se desarrolla hacia el final de la cola de maniobras, es decir hacia el oriente. Debido a que el planteamiento de la prefactibilidad interfiere con dos obras relevantes del corredor verde y la PLMB, se proponen alternativas en este nuevo estudio preliminar de la EMB. Las alternativas propuestas corresponden a las siguientes:

1. Profundizar la Estación 1 de la SLMB y que esta sea usada como pozo de recepción de las tuneladoras , tal como se ilustra en la Figura 22 :

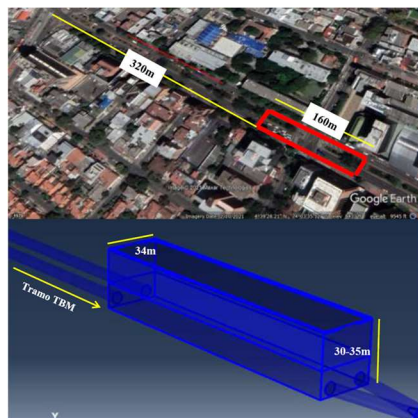


Fig. 5. Dimensiones Estación 1 de la SLMB

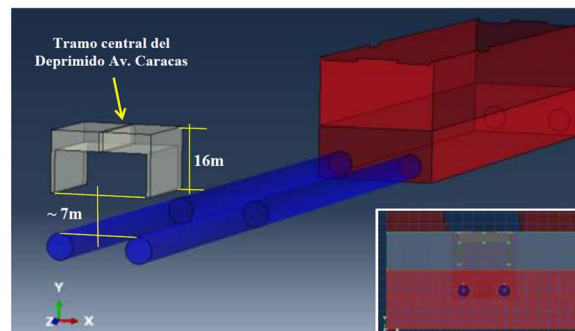


Fig. 6. Intersección Deprimido vehicular Av. 72 y Tuneles (TBM) para la SLMB

Figura 22. Alternativa planteada por EMB sector paso por debajo deprimido Av. Caracas y Estación 1- Fuente: EMB( 2021)

Con está alternativa se busco lo siguiente:

- Disminuir la pendiente hacia el occidente de la Estación 1 y pasar a un diámetro por debajo de la pantalla más profunda del deprimido de la Av. Caracas.
- Menor afectación en superficie durante construcción.
- Mejor amortización de las tuneladoras por mayor longitud de construcción.

El estudio de EMB recomienda evaluar la conveniencia de ubicar la estación al occidente de la Cra. 11, para disminuir la afectación durante la construcción. Para está alternativa se mencionan algunas ventajas y desventajas/ Riesgos que se indican a continuación:

Ventajas :

- Rendimientos de excavación
- Amortización de las tuneladoras, por mayor longitud de excavación.

Desventajas/ Riesgos:

- En caso de utilizar dos tuneladoras (7m de diámetro), se requeriría de una excavación sesgada entre tubos (importantes implicaciones en mejoramiento del terreno para completarla). Si la línea se excava con una única tuneladora (10 m de diámetro), esta desventaja desaparece.
- Que una vez concluida la excavación de la cola de maniobras, se requiere la construcción de un pozo de recepción que permita extraer la rueda de corte y la parte frontal tal del escudo. Este pozo se proyecta entre los edificios construidos entre la Cra. 7 y la Cra.5. El pozo sería de 24 m de ancho, por 7 m de largo y de 25 a 30 m profundo con pantallas de profundidad del orden de 40 m.

- El modelo geológico de la zona muestra la presencia de roca sedimentaria fracturada (arenisca) a la profundidad donde se excavaría la cola de maniobras. La tuneladora propuesta en la pre factibilidad (SS\_EPB) no permite la excavación en roca fracturada; esta alternativa requiere ajustar el tipo de tuneladoras (e.g. de escudo mixto “mixshield”) que permita la excavación tanto en terreno blando como en roca fracturada.
2. La segunda alternativa mencionada fue construir la cola de maniobras con métodos convencionales según se muestra en la Figura 23:

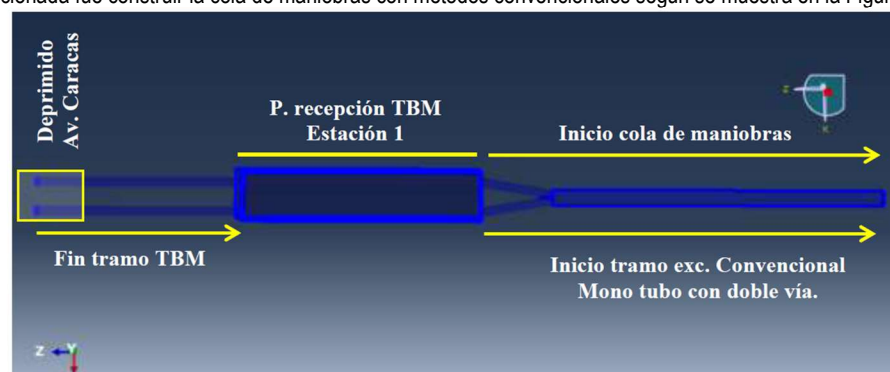


Figura 23. Alternativa propuesta en zona cola de maniobras según EMB- Fuente: EMB(2021)

Con la excavación convencional, el tramo de la cola de maniobras requiere la transición entre Bitubo (TBM) y Monotubo (convencional), la excavación convencional requeriría una sección de excavación de 8.3 m de alta, por 11 m de ancha, es decir con una área entre 70-75 m<sup>2</sup>.

Para lo cual indican las siguientes ventajas y desventajas / Riesgos.

Ventajas:

- Adaptabilidad a las condiciones del terreno.
- Posibilidad de ampliación de zona de parqueo (> 3 trenes)

Desventajas/Riesgos

- Rendimientos de excavación

**Comentarios de MOVIUS a las soluciones propuestas:**



- Con las propuesta de realizar el tramo de la cola de maniobras con sistema de excavación convencional se estaría incrementando el costo y el tiempo, aspecto que se revisará en la definición de las soluciones para este sector y contemplando cualquiera que sea el sistema final adoptado mono o bitunel.
- Si la solución con sistema convencional persiste por causa del tipo de material mixtos en la zona de cola de maniobras y por la necesidad de llegar arriba de la Cra 7 para poder generar el pozo de salida, se tendrá que lidiar con la profundidades de implante de las soluciones del Corredor verde, donde se tienen pantallas y pilotes hasta profundidades que varían de los 28.40 m a los 36.80 m, tal como se indica en la Figura 24.

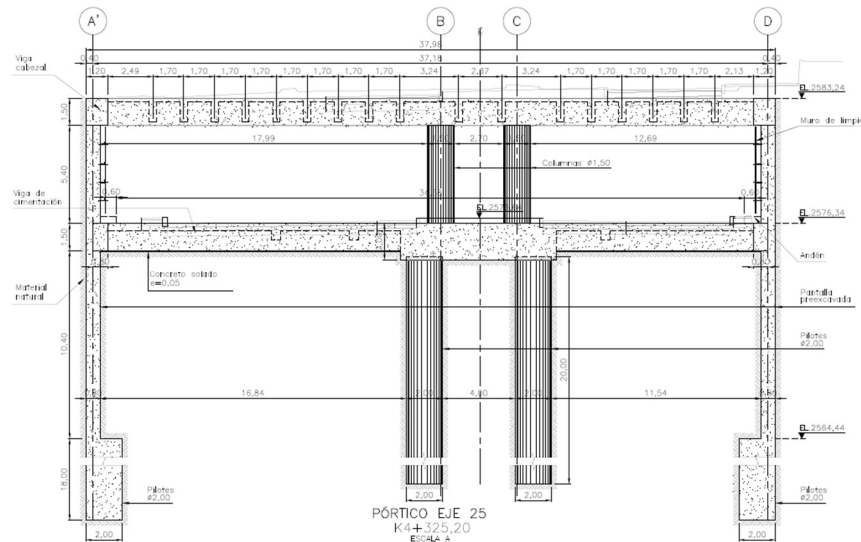


Figura 24. Perfil sector rotonda intersección Cra 7 con Calle 72 - Corredor verde - Fuente: Ingetec ( 2017)

- Al disponerse de un sistema de construcción para la cola de maniobras con excavación convencional, si bien se puede realizar con secciones parcializadas tipo NATM, esta obra requiere de pre soportes y pretratamientos para control de filtraciones de agua, mejoramiento del terreno para garantizar la estabilidad del frente y global, aspectos que pueden resultar muy costosos y demorados.
- Una solución con tuneladora con escudo cerrado y control de presiones del frente, p.e VDS (Máquina de densidad variable) que es una máquina que combina tanto una EPB como una Slurry Shields, podría resultar en una posible opción, aspecto que será estudiado a la luz de los resultados de las exploraciones en ejecución. Hoy en día se sabe que existen muchas experiencias donde esta condición geológica parecida ha sido realizada en líneas de Metro, por ejemplo en México y otros casos que son mencionados más adelante en la experiencias internacionales( Benchmark).

De la información del estudio de la Línea 1 del Metro de Bogotá, el Tramo 4 que corresponde al tramo desde Lourdes hasta la Calle 127 fue finalmente considerado con un sistema de túnel entre pantallas. Las razones principales para modificar el método constructivo de EPB al sistema con trinchera o túnel

entre pantallas fueron: a) identificaron un cambio de materiales de depósitos coluviales y aluviales a suelos lagunares blandos, de la formación Sabana, de espesor variable que pueden alcanzar hasta 120 m de espesor. Según ese tipo de estratigrafía también identificaron una subsidencia regional importante cuyos asentamientos regionales podrían tener efectos en el túnel por fricción negativa, sobrecarga y variación del alineamiento vertical. En consecuencia plantearon que para controlar estos efectos, el diseño de la L1MB debía pasar del sistema EPB a construir el túnel al abrigo de pantallas, así como las estaciones apoyándose en los materiales coluviales. Si bien este concepto es posiblemente válido, se considera que en la zona de la cola de maniobras hasta tanto se tenga completa información que de claridad de la estratigrafía del sector, para verificará la aplicabilidad del tipo de máquina o la opción de pasar a un sistema parecido al que se estableció en la L1MB ( opción subterránea), es decir un túnel bajo abrigo de pantallas.

## 2. Análisis Multicriterio prefactibilidad complementado con estudio de EMB

El informe del entregable 6 presenta un análisis multicriterio con siete criterios principales, que luego la Empresa Metro de Bogotá los incrementa a 8, denominados; 1) obra civil/ estructuras subterráneas, 2) plan de obras, 3) Estaciones subterráneas, 4) Explotación comercial de Metro, 5) Riesgos constructivos, 6) Evacuación de emergencia, y 7) Adquisición predial y 8) agregado por EMB relacionado con Tramo Av. Caracas Estación E1. En cada uno de estos criterios se generan varios subcriterios.

Para el criterio de obra civil, la prefactibilidad expone seis subcriterios que luego son agregados 2 más por la EMB; relacionados con: 1) volumen excavado(m<sup>3</sup>/m), 2) concreto de segmentos de dovelas, 3) concreto de relleno, 4) radio de giro o maniobrabilidad de la TBM, 5) costos de al tuneladoras, 6) logística para operación y 7) evacuación de emergencia y futuras conexiones. Varios de estos sub criterios fueron evaluados haciendo la proporción en cantidades de obra o elemento geométrico involucrado entre opción Mono y Bitúnel y de ese modo le dieron un puntaje proporcionando a cada caso en particular. Como comentarios a esta parte se tienen los siguientes:

- La diferencia en costo de tuneladoras entre las dos versiones que presenta la información es apenas de un 3% entre las dos opciones o sistemas. No obstante, consultado varios fabricantes y referentes parecidos, el costo entre versión Mono túnel a Bitúnel puede diferir en cerca del 36% siendo más costoso del sistema Bi- Túnel.
- En el caso del sub criterio de evacuación de emergencia, la prefactibilidad demerita la utilización de pozo versus el uso de galerías de conexión, sin una justificación clara.
- Con respecto al subcriterio de conexiones futuras este es subjetivo y podría ser más complicado en la opción Bitúnel que en la opción Mono túnel.
- La mayoría de los sub-criterios se podrían contabilizar en cantidades de obra y tiempos, eliminado el grado de subjetivismo que se ha involucrado en la evaluación.

En el criterios de plan de obras se han considerado 4 subcriterios como son: 1)Tramos de túnel, 2)estructuras auxiliares, 3) instalación o colocación de la vía férrea y 4) instalación de sistemas para operación. Los comentarios a este criterio son los siguientes:

- El sub criterio de estructuras auxiliares no es claro cómo fue evaluado, puesto que castigan a la opción Mono túnel por aplicar pozos versus a la opción Bitúnel con galerías en forma subjetiva.
- En los demás sub criterios igualmente aplican criterios subjetivos, donde algunos fueron valorados en contra de la opción Mono túnel.

- Como medidas de mejora se considera que varios de estos subcriterios pueden ser evaluados en costos y tiempos, con miras a reducir la subjetividad entre ellos.

En el tercer criterio de Estaciones, la prefactibilidad plantea 2 subcriterios que luego el estudio de la EMB los aumenta a 5, varios de ellos relacionados con aspectos geométricos o elementos de la estación. Por ejemplo estos subcriterios son los siguientes: 1) tipo de andén, 2) ancho de la estación, 3) profundidad, 4) longitud de la estación y 5) instalaciones mecánicas, electromecánicas e hidráulicas, donde dependiendo del estimado de las dimensiones hacen una proporción para cada opción en la valorización o adoptan una valoración subjetiva según sea el caso. Respecto a estos criterios se comenta lo siguiente y se da una solución de mejora:

- El tipo de andén si bien su conformación es característico para la estación Mono o Estación Bitúnel, el ancho de este es típico y del orden de 4.50 m común para ambos sistemas. Este elemento si bien condiciona el ancho de la estación ya quedaría intrínseco dentro del segundo sub criterio que es ancho de la estación.
- El estudio ha asumido para la opción mono túnel un ancho de 21 m , y para la opción Bitúnel de 25 m. No obstante, revisando este aspecto resulta para la opción Bitúnel del orden de 30 m y para la estación Mono de 26 m ( con la posibilidad de implante de 23 m para la zona de la Calle 72, donde se tienen restricciones por espacio entre edificaciones). Este aspecto finalmente se puede contabilizar bajo el concepto de análisis de cantidades y costos.
- La profundidad de la estación fue condicionada a tener 1 diámetro desde superficie a la clave de los túneles, con lo cual resulta castigada la opción Mono túnel. Sin embargo, si tanto el ancho, profundidad y longitud se relacionan en una contabilización de cantidades y costos resulta de una mejor manera de evaluar este aspecto técnico para definir cuál opción es más viable.
- La longitud de la estación por aparatos de vía, indican que será de 150 a 160 m, dándole una relevancia baja a este sub criterio. Sin embargo en estaciones Bitúnel, es necesario disponer en algunas estaciones una longitud extra de la estación para cambiavías que son normalmente de 100 m a 200m, aspecto que debe ser tenido en cuenta en la valorizaciones de las matrices multicriterio tanto en la prefactibilidad como en la realizada por EMB.
- Algunos de los subcriterios propuestos para las Estaciones pueden ser valorados en cantidades y costos, como tiempos, con lo cual se podría reducir o eliminar la subjetividad en la valorización de las opciones.

El cuarto criterio se relaciona con la explotación del Metro, en donde plantean como subcriterios 2 en la prefactibilidad y adicionado otro en el estudio de EMB, que corresponde con: 1) Estaciones, costos de operación y mantenimiento (Opex), 2) Ventilación , 3) operación en modo degradado. Los comentarios a estos subcriterios son los siguientes:

- Para el primer subcriterio, en la opción Mono, se le da una valoración desfavorable al Mono túnel versus a la opción Bitúnel, cuando en realidad podría ser más costoso los costos de operación de estación Bitúnel si se tienen en cuenta el costo y tiempo de mantenimiento de está y de los dos túneles.
- En el caso de operación en modo degradado si bien le dan mejor calificación a Mono Túnel, no refleja que la opción Bitúnel requiere de prolongaciones de las estaciones con un incremento notable de costos y tiempos.
- En estos subcriterios se aplican en forma subjetiva los puntajes descalificando a la opción Mono. Estos sub criterios pueden ser analizados también en términos de costos y tiempos para reducir la subjetividad.

El quinto criterio se refiere a riesgos, donde la prefactibilidad plantea 3 subcriterios, que luego son aumentados a un total de 5 por la EMB. Estos subcriterios son; 1) frente mixto, 2) frente de obra tuneladoras, 3) profundidad de subsidencia, 4) ancho de subsidencia, 5) aparato de vía, 6) evacuación de conexiones entre tubos o pozos. Los comentarios a esta parte de riesgos son los siguientes:

- En el primer sub criterio relativo a los materiales de diferente clase, se descalifica en mayor grado al Mono túnel que al Bitúnel, cuando ambos sistemas tendrán que sortear esa opción en caso de que se presente.
- Respecto al frente de obra tuneladoras mencionan que la opción Bitúnel exige menor grado de incertidumbre por las lecciones aprendidas del 1<sup>er</sup> túnel con respecto al 2<sup>o</sup> túnel, pero esto es relativo, ya que en ambos casos Bitúnel o Monotubo siempre habrá un primer túnel que debe afrontar la misma problemática. Es más, en la opción Mono una vez superado cualquier problema en algún sitio crítico, no habrá que lidiar más con esto. Mientras que en la opción Bitúnel (si bien el primero da lecciones), no elimina del todo volver a tener que enfrentarse al problema encontrado en el segundo túnel en algún sitio crítico.
- Respecto al ancho de la cubeta de asientos, es correcta la apreciación en el estudio de la prefactibilidad, como también por lo indicado en el informe multicriterio de EMB. Esto tiene fuerte incidencia en la zonas donde el espacio de implantación es angosto, como es el caso de la calle 72 y donde la opción Bitúnel al ser más superficial impacta en mayor grado que una opción Mono túnel.
- Por otra parte, se hace relación a la profundidad de la cubeta de asientos, que se entiende como al asentamiento máximo esperado. En la valorización este aspecto fue castigado para el Mono túnel. No obstante, al aplicar los criterios o la metodología presentada en los documentos de prefactibilidad y/ o de la EMB, relacionada con Peck (1969) y/o Farmer y Atewell (1974) respectivamente para analizar ese aspecto técnico, se observa que el asentamiento máximo que puede ser estimado con estos métodos empíricos, muestra que ese valor es inversamente proporcional a valor “ i ” (distancia de inflexión de asientos desde el eje del túnel) y que en caso de Mono túnel ese valor “ i ” es mayor que en el caso de Bitúnel. En consecuencia el asiento máximo esperado en el Mono túnel es menor que en el caso Bitúnel, cuando se analiza para una relación de Z/D de 1.5, tal como fue así previsto dentro de los criterios de análisis de los estudios mencionados.
- En relación con las evacuación se indica que la opción Mono túnel dispone de pozos cada 762 m y la Bitúnel de galerías de interconexión cada 250 m. Sin embargo, la opción Mono recibe menor calificación que la Bitúnel, sin tener en cuenta que las galerías de interconexión cada 250 m, tendrán que excavar con método tradicional, con la necesidad de realizar mejoramientos del terreno para reducir filtraciones de agua hacia los túneles y además para consolidar el terreno para asegurar la estabilidad, además de que constructivamente se requiere de accesos para estas excavaciones y que estas obras afectan o impactan el cronograma, dado que las máquinas EPB y todo el sistema de evacuación se encuentra operando durante la construcción de los túneles.
- En términos de mejora respecto a está parte se menciona que el cualquiera de las opción ya sea Mono túnel o Bitúnel se tendrá que diseñar bajo la normatividad de la NFPA 130 garantizando la seguridad necesaria.

El sexto criterio se refiere a evacuación de emergencia, donde se han previsto dos subcriterios; 1) recorrido hasta lugar seguro , y 2) zona de evacuación. Los comentarios a está parte del análisis son los siguientes:

- En ambos subcriterios la condición Mono Túnel fue evaluada con un valor más bajo que la opción Bitúnel, siendo castigado en el tema de recorrido al darle el valor más bajo y el mayor peso a este subcriterio. Sin embargo estos conceptos son subjetivos y no invalidan la condición de Mono túnel, pues si eso fuera así, su tendencia a nivel mundial no estaría incrementado, o en la región (latinoamérica está opción no sería la dominante).
- Ambos subcriterios presentan un alto grado de subjetividad.

El séptimo criterio se relaciona con la adquisición predial. En está parte se adoptaron tres subcriterios; 1) ancho de servidumbre subterránea, 2) adquisición y ocupación de predios, 3) ocupación temporal de predios. Los comentarios de estos criterios y sus subcriterios son:

- Llama la atención que en el primero y último subcriterio, donde fue calificada de mejor manera el caso Mono túnel que la opción Bitúnel, el peso de los subcriterios es más bajo, y en el subcriterio intermedio donde fue calificado más desfavorable el Mono túnel, la porcentualidad o peso del subcriterio es mayor.
- En esta evaluación se debe tener claro que la opción Bitúnel afectará en mayor grado, no solo por implante de las estaciones, sino también por el efecto de subsidencia, donde en la calle 72 este aspecto apunta a que la opción Bitúnel no puede ser valorada con mayor número y peso que la Mono túnel.

El octavo criterio se refiere a la solución del tramo Av. Caracas a Estación No. 1. En este se plantean cuatro sub criterios que son: 1) profundización para paso del deprimido Av.Caracas, 2) frentes Mixtos, 3) aparato de vía, 4) pozo de recepción de la cola de maniobras. En la mayoría de estos subcriterios la opción Mono túnel recibió una calificación menor que la Bitúnel. Sobre estos subcriterios se tiene los siguientes comentarios:

- La valorización de la matriz fue realizada sobre los supuestos y ajustes realizados por la EMB para la zona de la Av. Caracas. Sin embargo, existen propuestas de mejora de Movius en este sector, con lo cual se podrán reducir los costos, las afectaciones en superficie y los aspectos prediales y sociales, así como se podría lograr una interconexión más eficiente entre la Estación 1 del L2MB con la estación de la Línea 1 del Metro de Bogotá prevista en la Av. Caracas. Además también se pueden prever soluciones razonablemente técnicas para pasar la zona del deprimido que se tienen previsto por la L1MB, con la solución Mono túnel.
- No queda claro el porqué se castiga más a la opción Mono túnel ante frentes mixtos, si en cualquiera de las dos opciones, los túneles se tienen que enfrentar a esa condición en forma similar y los impactos son parecidos.
- El aparato de vía es subvalorado en la opción Bitúnel, pues este puede tener un impacto alto en costo y tiempo, como en afectación predial y social en la zona, ya que la estación se requiere extender en cerca de 300 m por el tema de cambiavías.
- Asumen un pozo de salida al final de la cola de maniobras, que la extienden hasta el oriente, arriba de la Cra 7, con las consecuencias que esto tiene, pues en esa zona de edificaciones altas donde el espacio es reducido. En segundo lugar habría que pasar por debajo de las obras del corredor Verde, donde se tiene prevista una rotonda subterránea en toda la intersección de la carrera 7 con Calle 72. En ese sector es posible que se presenten materiales de aluvial combinados con arcillas y presencia de fuentes de agua artesianas, por lo que los estudios de prefactibilidad y de la EMB indican que la cola de maniobras se debería realizar con el sistema de excavación convencional (NATM) en vez de utilizar las tuneladoras. No obstante, este sistema tiene riesgos, con mayores costos y tiempos, dado la presencia de agua artesiana, los materiales allí presentes y la presencia de edificaciones altas adyacentes que hace que se tenga controlar de una mejor manera los asentamientos.



### 3. Análisis Mono Túnel Versus bitunel.

MOVIUS procedió a revisar el análisis entre la tipología Bitúnel versus Mono túnel, donde varios de los criterios y/o subcriterios de peso importante en el CAPEX fueron traducidos en términos de cantidades, costos y tiempos, buscando así reducir o eliminar la subjetividad, con lo cual se establece una diferencia en costos menor para la tipología Mono túnel que la tipología Bitúnel. Además según la investigación realizada por MOVIUS respecto a soluciones Mono túnel o Bitúnel, encontró que si bien a nivel mundial ambas tipologías suelen ser implementadas, en la región( Centro y Latinoamérica ) existe una mayor tendencia a implantar una solución Mono túnel básicamente por tema de costos. Un estudio más detallado es presentado por FND -MOVIUS (2022), comparando las dos tipologías Mono versus bitunel.

### 2.2.24.3 ASPECTOS RELEVANTES DE LOS ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA PLMB

#### 2.2.24.3.1 LÍNEA 1 METRO DE BOGOTÁ - SUBTERRÁNEA

Los estudios de la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB) fueron propuestos con una línea ferroviaria subterránea de 27 km de longitud aproximadamente.

El trazado se basó en los estudios previos que se habían realizado y consensuado con el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano). Este proyecto presentó una longitud total de 27,061 km y 27 estaciones.

El estudio consideró para la tuneladora un diámetro interior de uso de 9,80 m, el cual se aumentó en 24 cm para admitir ciertas tolerancias constructivas, cuyos diámetros teóricos interior y exterior del anillo de dovelas fue de 9,80 m y 10,56 m (para espesor de dovelas 0,38 m), respectivamente.

A lo largo del trazado también se diseñó una sección tipo de túnel convencional para el caso de pasos concretos, considerando para dicha sección los mismos gálibos previstos en la sección con tuneladora.

En la Figura 25, se presenta el trazado de la línea originalmente prevista subterránea, además en la Figura 26 y Figura 27 las secciones típicas previstas en este estudio.









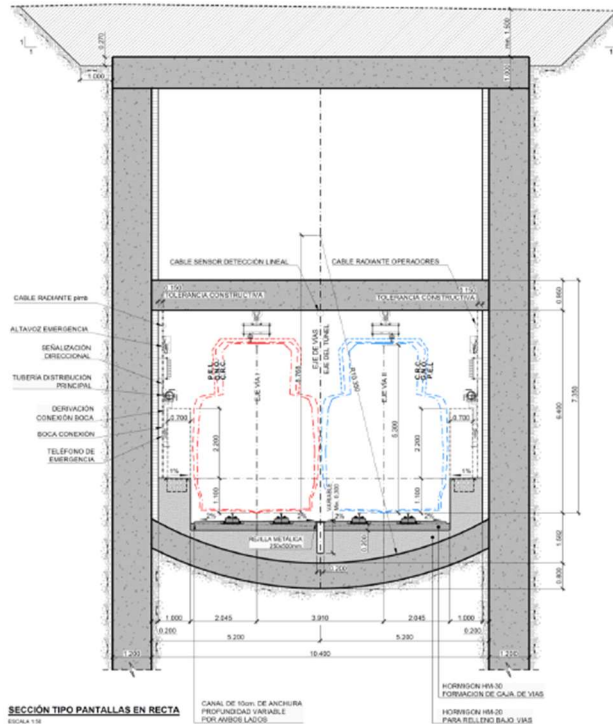


Figura 27. Sección Tipo Túnel entre pantallas- Fuente IDU( 2015)

A pesar de la presencia de bloques rocosos en la Formación Bogotá, siendo un obstáculo resoluble que penalizaría el avance de la tuneladora, se consideró que la opción más favorable era el túnel con tuneladora en el tramo inicial (desde el Parque Tercer Milenio –Tramo 2- hasta la Estación de Gran Colombia) y continuar luego con el túnel al abrigo de pantallas continuas de hormigón con “costillas” o “tapón” de jet-grouting en el fondo, si fuera preciso, en el resto (hasta la Estación Plaza de Lourdes).

Para el Tramo 4 que comprende desde Lourdes hasta la Calle 127, el estudio indica que existe un cambio de depósitos coluviales y aluviales a suelos lagunares blandos de la formación Sabana, de espesor variable que pueden alcanzar hasta 120 m de espesor. Los niveles piezométricos registrados muestran la ocurrencia de presión artésiana en estratos coluviales subyacentes a los estratos arcillosos blandos de la formación Sabana. Se menciona además que en esta zona se marca una subsidencia importante por efecto de la

construcción de edificaciones con sótanos donde los sistemas de drenaje con algunas filtraciones a través de los muros que han ocasionado el descenso de nivel freático al menos hasta profundidad de sótanos y con lo cual se ha registrado asentamientos importantes. Por otra parte el estudio de la L1MB menciona que con los análisis preliminares de tipo unidimensional y considerando el abatimiento en profundidad, estimaron que el potencial máximo de asentamientos por subsidencia regionales podrían ser del orden de 40 a 80 cm. Se menciona que esos asentamientos regionales pueden tener efectos graves sobre las pantallas y el túnel por fricción negativa, sobrecarga y variación del alineamiento vertical. En consecuencia plantearon que para controlar estos efectos, el diseño de la L1MB considero a lo largo del tramo afectado por esta problemática, construir el túnel al abrigo de pantallas, así como las estaciones apoyándose en los materiales coluviales donde termina el efecto de las variaciones en los niveles piezométricos.

El estudio de L1MB recalca que el principal condicionante de este tramo, es su aspecto geológico-geotécnico, dado que gran parte atraviesa suelos lacustres muy blandos , con una subsidencia regional importante. Se indica que ese condicionante hace muy poco viable el uso de la tuneladora, dado que se pueden producir asientos totales importantes, con un asiento diferencial inadmisibles a lo largo del túnel en línea, y unas diferencias de comportamiento en los puntos “duros” (entronque estación-túnel) también inadmisibles. Además, durante la ejecución del túnel en este terreno tan blando con tuneladora, consideran que se produciría un “cabeceo” de la misma, ya que la tuneladora, debido a su peso, tiende a bascular e hincarse en el terreno, con las dificultades operativas y constructivas que ello supone. Por todo ello, para poder usar la tuneladora mencionan que habría que plantear una solución con apoyos o “muletas” sobre la capa inferior más competente (coluvial), situada esta entre 20 m y 50 m de profundidad. También señalan que esta solución tiene una seria duda en cuanto al comportamiento estructural del túnel, al presentar una serie de puntos duros discretos, englobados en un suelo muy blando y soportando el empuje de la tuneladora durante la fase de avance. Debido a está problemática establecen que la solución mediante pantallas, el problema se minimiza dado que todo el conjunto (túnel y estaciones) presentaría un comportamiento similar. Para reducir el asiento se plantea llevar módulos de pantallas hasta la capa competente (coluvial).

Para el Tramo 4, entonces se descartó el uso de la EPB por el problema importante de subsidencia regional, y por ello se acondicionó el método constructivo. Finalmente optan por una solución de túnel al abrigo de pantallas continuas de hormigón con “costillas” o “tapón” de jet-grouting en el fondo en todo el Tramo, desde la Estación de Lourdes hasta el fin del trazado (Calle 127). Véase Figura 28.

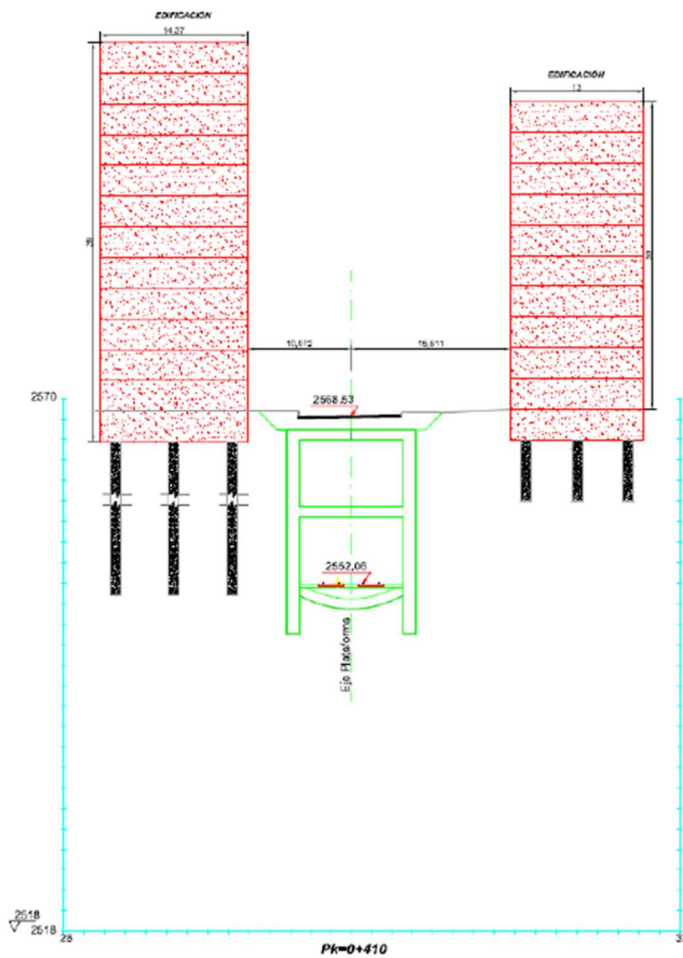


Figura 28. Túnel en trinchera

En este Tramo 4 se previó la ejecución del túnel bajo el cauce del río Molinos con una sección tipo de túnel convencional, con tratamiento previo, dado que no era operativo plantear un desvío provisional del cauce; y también se proyectó otra sección con túnel convencional, con tratamiento previo para pasar bajo la estructura de la Calle 127, ya que era muy difícil encajar pantallas entre las fundaciones existentes.

Dentro del análisis de este estudio consideraron que las tuneladoras EPB (Earth Pressure Balance) podían ser adecuadas para terrenos cohesivos, incluso inestables, y afectados por el nivel freático permanente. Mencionaron que la máquina puede disponer en su frente de una cámara, en la cual el material excavado mezclado con agua (bien del propio terreno o bien de aportación por la máquina) entra y es extraído cuando la presión provocada por el empuje de la propia máquina iguala a la del terreno.

Consideraron que este tipo de máquinas pueden trabajar en modo abierto, cuando el frente es estable y no hay que mantener la presión, o en modo cerrado con frentes inestables. El sistema considera imprescindible el uso de dovelas para contener el terreno y para que, mediante el apoyo de los gatos contra ellas, la tuneladora pueda avanzar. Se usan agentes condicionantes, como son agua, espumas, bentonita y polímeros para mejorar la plasticidad del terreno y facilitar la extracción del material.

Según el análisis conceptual se consideró que la tuneladora que más se adaptaba a las características del terreno de la Línea de Metro subterránea era una TBM EPB, ampliamente experimentada en el mundo para los diámetros previstos. De análisis presentando se extractan las siguientes aspectos a tener en cuenta:

- La cabeza perforadora podría incorporar una o varias machacadoras que reduzcan el tamaño de los bolos a una dimensión manejable por la máquina, con el fin de no condicionar hasta cierto límite las aberturas de la cabeza de corte, el diámetro del tornillo sinfín y su paso. Esta opción debe ser estudiada por los fabricantes de la máquina. Si no la consideran adecuada, las alternativas sería reducir el tamaño de los posibles bolos a base de giros y giros sin avance de la cabeza de corte (con el consiguiente desgaste de los elementos de corte), o bien habilitar cámaras hiperbáricas mediante las cuales se introdujesen operarios con martillos hidráulicos para reducir el tamaño de los bolos.
- La existencia de lentejones de arena con escasez de finos obliga a que la máquina pueda inyectar bentonita, además de otros productos, en la cámara de excavación.
- La presencia de material rocoso del Terciario, debe ser afrontado por la máquina mediante la posibilidad de sustituir las herramientas de corte tipo “Picas” de arcillas por “cortadores” de roca. Asimismo se deben montar estabilizadores que impidan un cabeceo de la máquina hacia donde aparezca el punto duro.
- La localización de metano en las muestras tomadas debe ser controlada en la máquina mediante detectores de presencia, ventilación y extracción del gas y equipos auxiliares de los trabajadores de los que la máquina debe estar dotada. Se debe instalar un control de insuficiencia de oxígeno.
- La combinación de la presencia de lentejones arenosos sin finos y del nivel freático alto, pueden hacer que la cámara de excavación esté en ocasiones llena de agua a presión. Esto hace que operaciones de comprobación de herramientas de corte y su sustitución pueda ser necesario llevarlas a cabo en condiciones hiperbáricas, para lo que la máquina debe estar diseñada.

Las características de la máquina tuneladora son las siguientes :

- Diámetro interior de 10.04 m y exterior de 10.80 m con un espesor de anillo de dovelas de 0.38 m. El gap entre el terreno y trasdós del anillo de concreto puede ser de 15-20 cm. La longitud de la EPB puede ser de 100 a 150 m( escudo y backup)

- La presión máxima del frente fue estimada del orden de 4,7 bares en la base del escudo y en la clave variable entre 2.5 bares y 3.8 bares.
- La potencia de corte estimada fue de 23.500 mkN, que se puede aumentar hasta 30.750 mkN para caso de desbloqueo.
- El sobrecorte es decir, el gap que se propuso fue del orden de 20 cm y de 10 cm para adaptarse al trazado.
- Se consideró además que se debía disponer de inyecciones en el frente, en la cámara, en la parte alta de la cámara, en el centro del mamparo, en el tornillo de extracción y en la parte alta del escudo.
- El anillo de dovelas fue considerado por 7 elementos de dovela, de las cuales 6 son iguales y una es la llave.

Además en la memoria geotécnica indicaron que los desplazamientos tienen un carácter casi radial hacia el centro del túnel y pueden afectar a los edificios próximos, si sus magnitudes son suficientes para ello. Además de los asentamientos, que son los movimientos que más habitualmente se evalúan, se deben considerar los movimientos horizontales, cuya influencia suele ser más dañina.

Los movimientos finales son función de un gran número de variables, como son : a) la geometría del problema, b) heterogeneidad del terreno, c) presencia de agua, d) proceso constructivo, e) deformación relativa, f) entibación del terreno, g) su evolución en el tiempo, h) los huecos entre el terreno y sostenimiento, e i) el tiempo que transcurre hasta que se realizan las inyecciones de contacto, entre otros.

Teniendo en cuenta todos esos conceptos, consideraron que las subsidencias generadas en superficie y en la variación de las presiones en el terreno alrededor del túnel, tienen en cuenta distintos factores:

- Riesgo de hundimientos
- Efectos de la excavación del túnel
- Efecto de las subsidencias regionales
- Efecto del sismo
- Efectos a largo plazo (consolidación y drenaje del agua a través del túnel)

La información del estudio para la primera Línea de Metro Subterránea, indicó que la metodología de cálculo siguió lo siguiente: se ha estimado un orden de magnitud de las presiones de trabajo recomendables en el frente mediante un “Cálculo del Empuje de las Tierras en Reposo”, y posteriormente se realizó una comprobación con FLAC3D, analizando el efecto que dichas presiones tenían en las subsidencias generadas en superficie.

Por otra parte teniendo en cuenta el análisis de las subsidencias regionales de acuerdo con estudios realizados por otros, estimaron que el porcentaje de consolidación obtenido para la fecha actual (2015) sería del orden del 70%, por lo que cabría esperar un asentamiento remanente en los primeros 25 m de espesor del material a largo plazo (35 años) del orden del 30%. con base en esa información realizaron una recalibración de los modelos para estimar el efecto de subsidencias regionales remanentes sobre el túnel.

Con respecto a los efectos por sismo el estudio presentó el informe “ Estudio de Riesgo Sísmico referido a la Primera Línea del Metro de Bogotá”, el cual describió el análisis relativo a la modelización del sismo para el caso de la tuneladora. Dicho análisis se llevó a cabo con el software PLAXIS 2D.

Con el diseño del túnel se estudiaron los efectos de la consolidación sobre este. Se analizó el impacto del flujo de agua a través del túnel, debido a una hipotética mala ejecución del relleno del GAP o por una junta en mal estado. El objetivo de este escenario de análisis fue ver su influencia en los asientos generados en superficie a largo plazo.

La conclusión que se extrajo de lo anterior fue que tanto el fenómeno de la consolidación como el de drenaje a lo largo del túnel, provocarían movimientos despreciables alrededor del túnel (inferiores al milímetro) según lo indica Consorcio L1( 2021), pero según comentario de MOVIUS siempre y cuando se siga un proceso riguroso constructivo con el control de las presiones del frente y el proceso de inyección del gap que queda detrás del escudo de la máquina EPB entre otros .

Por otra parte el informe resalta uno de los riesgos relacionado con la presencia de gases. Indican que de la totalidad de los sondeos realizados en la campaña de investigación geotécnica (332 sondeos), en 52 de ellos se detectó la presencia de gas metano que en algunos de los casos se manifestó por expulsión de gas a presión, acompañado de agua y material del fondo de la perforación (arenas, arcillas y pequeñas gravas). En otra parte importante se manifestó mediante la presencia de burbujas en el nivel de agua en el sondeo y en casi la mitad de los mismos, no se detectó la presencia de gas durante la perforación pero si al retirar la tubería de revestimiento, dando lugar a pequeñas burbujas de gas en el nivel freático, una vez terminada el sondaje.

Consideraron que las estructuras planteadas a las cotas donde se ha detectado el gas, puede dar lugar a explosiones indeseadas e imprevisibles, sobre todo en el caso de la tuneladora, debiéndose adoptar una serie de medidas de seguridad

Se indica que la materia orgánica se ha localizado en todos medios de sedimentación encontrados a lo largo de la traza: sedimentación lacustre, aluvial, conos-piedemonte, con espesores variables desde centímetros hasta 2-3 m y continuidades desde pequeños lentejones métricos hasta heptométricos y en algunos casos, sobre todo en los sedimentos aluviales de la terraza baja, con gran continuidad lateral, aunque en forma lentejonar. El contenido de materia orgánica en la mayor parte de las muestras tomadas en este nivel varió entre el 5% y el 30% (una muestra llegó hasta el 70%).

El gas metano que está presente en este tipo de formaciones es un gas inflamable, lo que incrementa el riesgo de incendio ante una llama o chispa. Pero además, se indica que es un gas que mezclado con el aire en una proporción entre el 5% y el 15% en volumen es explosivo. Por encima de este límite de concentración la mezcla resultante no es explosiva, pero con valores de concentración de metano superiores al 15 % se puede provocar la asfixia. En consecuencia es imprescindible para permitir el trabajo garantizar en todo momento una atmósfera limpia en el interior del túnel, libre de gases deflagrantes. Por eso recomiendan utilizar el mayor número posible de sistemas eléctricos antideflagrantes. Como otras medidas como son:

- Proveer metanómetros montados sobre la tuneladora que registren de manera continua la concentración de metano en la atmósfera cerca del frente de excavación. Los metanómetros deben ser ajustados para que ante un determinado valor de la concentración de gas den una alarma y cuando, se sobrepase un segundo nivel de concentración, envíen una señal que producirá el disparo de la instalación eléctrica.
- Otra parte importante del sistema son los propios dispositivos de corte automáticos que ante la señal de los metanómetros producen el disparo de la instalación dejando sin tensión todos los equipos eléctricos a excepción de unos pocos que deben mantenerse en funcionamiento como son los ventiladores.

- Por último, está el propio diseño de la ventilación en la zona próxima al frente de excavación diseñada especialmente para aumentar el caudal de aire limpio produciendo una hiperventilación del frente en el caso de una afluencia inesperada de metano.

Además previeron varios planes de actuación ante la presencia de gas metano, los cuales dependen del nivel de concentración de dicho gas en el aire.

Como medida adicional y dado que observaron que en los sondeos donde se había localizado la presencia de gas metano, se observó que la evolución del mismo pasó desde un periodo donde el flujo de gas a la superficie era importante (en algunos casos violento) hasta que pasadas unas horas y puntualmente 2-3 días la presión, y por tanto el caudal, disminuyó drásticamente para acabar siendo una salida lenta y constante en el tiempo o hasta su desaparición.

En vista de ese comportamiento, estimaron que la presencia de gas y por tanto las bolsas que lo contienen son de pequeñas dimensiones y que pasados un tiempo tenderán o bien a agotarse o a mantener una pequeño caudal, siempre que se ponga en contacto la bolsa de gas con la superficie atmosférica. Con base en esa interpretación plantearon que una posible medida paliativa de cara a disminuir la presión del gas existente o incluso su total evacuación, podía ser la realización de perforaciones sistemáticas en aquellas zonas definidas en el perfil con presencia de gas, antes de la llegada de la tuneladora y antes de efectuar los tratamientos del terreno que se puedan prever.



#### 2.2.24.3.2 Interceptores en la Ciudad de Bogotá

##### 2.2.24.3.2.1 Túneles principal y de emergencia del interceptor Tunjuelo Canoas-Consorcio Canoas, 2010

El Interceptor Tunjuelo-Canoas es el emisario final de los interceptores del río Bogotá (IRB) zona sur. Éste tiene una longitud aproximada de 8.86 km excavados en suelos blandos, con un diámetro interior de 4.2 m revestido en dovelas colocadas con una tuneladora de doble escudo con Earth Pressure Balance (EPB), y una longitud de 2.2 Km excavadas en rocas por una tuneladora con diámetro de 3.2m, igualmente revestido en dovelas de concreto de alta resistencia (aproximadamente 600 kg/cm<sup>2</sup>).

De acuerdo con el estudio geotécnico se identificaron los siguientes materiales:

- Capa de suelo que corresponde a una arcilla limo arenosa y areno limosa de color gris y oxidada en presencia de gravas, con valores N de SPT desde 8 para el material blando hasta 58 para el material mas resistente. El espesor de esta capa varía entre los 10m y los 12m.
- A partir de las profundidades indicadas anteriormente se observó una transición hacia la roca, con espesores de 0.5m a 2 m, compuesta por arcillolita meteorizada con algo de arena oxidada.

El informe de diseño geométrico de las dovelas hace una descripción sobre el método de excavación. indica que usaron máquinas tipo TBM (Tunnel Boring Machine) con la tecnología EPB (Balance de presión de tierras) para balancear las presiones de excavación. El soporte / revestimiento fue compuesto por anillos prefabricados de concreto reforzado de longitud promedio de 1,5 m para el túnel ITC, y 1,2 m para el túnel de emergencia. Se menciona que el diámetro interno de estos túneles es de 4,20 m para el ITC y 3,20 m para el túnel de emergencia. Cada anillo estuvo compuesto por seis segmentos prefabricados de concreto reforzado, uno de los cuales actuó como clave o cuña permitiendo que el anillo quedará estable a compresión. La instalación de estos anillos se realizó en la parte posterior de las TBM y fueron colocados una vez la máquina excavó una distancia equivalente al ancho del anillo. Las características de la TBM fueron las siguientes:

Tabla 4. Características de las máquinas

Característica	TBM 4200	TBM 3200
Tipo máquina	EPB	EPB
Fabricante	Herrenknecht	Herrenknecht
Diámetro excavación	4996	3896 mm
Número de gatos empuje	12	12
Empuje máximo total	18252 kN	13600 kN
Recorrido gatos empuje	2200 mm	1850 mm
área zapatas de empuje	0.0396 m <sup>2</sup>	0.020 m <sup>2</sup>

Fuente: Consorcio Canoas, 2010. Contrato No.1-01-25500-1115-2009. Diseño geométrico dovelas I-TU-PT-001

En este caso particular el radio mínimo seleccionado será de 400 m para el ITC (interceptor Tunjuelo Canoas) y de 179 m para el TE (túnel de emergencia).

Tabla 5. Características de las dovelas

Característica	ITC	TE
----------------	-----	----



REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

Diámetro externo	4700 mm	3600 mm
Diámetro Interno	4200mm	3200mm
Espesor	250 mm	200 mm
Longitud media	2339.01 mm	1793.16 mm
Longitud mínima	1897.28 mm	1475.52 mm
Longitud máxima	2604.20mm	2088.42mm
Radio de proyecto	800 m	340 m
Radio mínimo	400 m	179 m
Número de dovelas	6 unidades x anillo	6 unidades x anillo
Tipo de Montaje	Mecánico - Erector	Mecánico - Erector
Sellos para las infiltraciones	Sello de EPDM CS 003 o M385 41a Type Tokio	Sello de EPDM CS 006a o M385 50a Type Lille

Fuente: Consorcio Canoas, 2010. Contrato No.1-01-25500-1115-2009. Diseño geométrico dovelas I-TU-PT-001

Tabla 6. Característica de los materiales de las dovelas

Características de los materiales
Concreto para segmentos prefabricados

REALIZAR LA ESTRUCTURACIÓN INTEGRAL DEL PROYECTO LÍNEA 2 DEL METRO DE BOGOTÁ, INCLUYENDO LOS COMPONENTES LEGAL, DE RIESGOS, TÉCNICO Y FINANCIERO

E2 - DEBIDA DILIGENCIA TÉCNICA – L2MB-0000-000-MOV-DP-GEN-IN-0001 \_VF

Clase	C35/45
Módulo Elástico	33300 N/mm <sup>2</sup>
Acero en varilla de Alta Adherencia	
Tensión de fluencia	600 N/mm <sup>2</sup>

Fuente: Consorcio Canoas, 2010. Contrato No.1-01-25500-1115-2009. Diseño geométrico dovelas I-TU-PT-001

Para el túnel de emergencia determinaron los asentamientos producidos por la excavación mecánica del TBM y las deformaciones alrededor de la excavación por sectores, según se indica en la siguiente tabla:

Tabla 7. Asentamientos estimados para el Túnel de emergencia

Sector	Descripción	Deformación Radial (cm)	Volumen Perdido (m <sup>3</sup> )	%
K0+000 - K0+350	Perfil de suelos arcillosos y arenosos	12,00	1,46	11,62
K0+350 - K1+300	Formación Lodosa o arcillosa Arenisca Labor (Ksgl-1)	0,04	0,01	< 0.1%
K1+300 - K1+900	Formación Plaeners (Ksg-p)	0,08	0,001	< 0.1%
K1+900 - K2+500	Formación Arenisca Dura (Ksg-d)	0,04	0,0047	< 0.1%
K2+500 - K2+800	Suelo arcilloso de la formación Tilalá	0,0283	0,0035	< 0.1%
K2+800 - K2+950	Formación Arenisca Dura (Ksg-d)	0,0049	0,0006	< 0.1%

La información consultada indica que la diferencia entre el diámetro de la excavación del TBM y el diámetro externo de los elementos prefabricados puede variar entre un rango de 150 mm a 370 mm y el relleno de este vacío es esencial para el éxito del proceso constructivo. En consecuencia mencionaron que un relleno apropiado con mortero minimizaba los asentamientos, mantenía el anillo en su puesto durante el avance, y aseguraría la estabilidad a largo plazo de la estructura sumergida dentro del terreno.

Para los acondicionadores del terreno se definieron las condiciones óptimas para la tecnología EPBS las cuales fueron: 1) Contenido de finos no menor de 10%;2) Permeabilidad de por lo menos 5-10 m/s y 3) Cabeza de presión de agua menor a 3 bares.

Como parte de las conclusiones respecto a la excavación de este sistema en suelos mencionaron lo siguiente :

- Las experiencias recientes con tecnología EPBM (excavación mecanizada con frente cerrado) han indicado que en arenas y gravas un nivel alto de control de asentamiento puede alcanzarse y las pérdidas de volumen registradas están son mínimas ( $V_L < 0.5\%$ ), mientras que en arcillas,  $V_L$  se encuentra dentro de un rango del 1 al 2%, excluyendo los asentamientos a largo plazo.
- La presión en el frente se controla por medio del balance entre la velocidad de avance del escudo (de manera proporcional al material excavado) y la velocidad de descarga del material excavado proporcional a la velocidad de rotación del transportador sinfin. La presión de soporte siempre debe garantizar un avance seguro; sin riesgos y que cubra todas las incertidumbres y la posible variabilidad de los parámetros del terreno.

- Las funciones de los acondicionadores durante la operación del equipo EPBS son: (1) garantizar la presión de soporte requerida en el frente; (2) facilitar la formación de “conexión” dentro del tornillo sinfín; y (3) minimizar el torque en la cabeza de corte y en el uso de las herramientas de corte.



#### 2.2.24.3.3 Caso del evento ocurrido en la Calle 72 con Cra 7.

En la calle 72 con carrera 7, en 1994, se estaban construyendo dos torres de oficinas de 15 y 19 pisos con cinco sótanos subterráneos para parqueos. Cuando se estaba en la construcción de los sótanos con una profundidad del orden de 18.5 m, debajo de la calle 72, se produjo un derrumbe el día 9 de mayo de 1994, a las 2 p.m en la esquina sur occidental generando pérdidas humanas y materiales, llevándose consigo parte de la calzada sur de la Calle 72, interrumpiendo el tráfico por varias semanas.

El método constructivo que adelantaba el constructor fue un método mixto incluyendo en la parte superior muros atirantados. El método consistía en excavar verticalmente tramos en el perímetro de los sótanos, introduciendo mediante perforaciones varillas de acero que se anclaban al suelo con inyecciones de mortero cemento. Sobre el talud vertical se construyó una pantalla de concreto lanzado que se conectó a las varillas de tal manera que luego fueran tensionadas y el conjunto pantalla y tensores tomarían los empujes de tierra para asegurar la estabilidad del perímetro de la excavación. Este sistema se empleó hasta el nivel de 4° sótano.

La pantalla vertical se sostuvo con columnas de concreto construidas previamente por medio de pilares huecos, los cuales llevaron las cargas a estratos, 3 m por debajo del nivel de 5° sótano.

En el tramo del 4 al 5° sótano no se resolvió con el mismo sistema, sino se dejó una berma de suelo horizontal de 1,0 a 1,20 m de ancho, con un talud 2 vertical a 1 horizontal, y de una altura del orden de 4 m, la cual contrarrestaría los empujes del talud a ese nivel.

De los análisis realizados al sitio por varios expertos y una comisión investigadora la secuencia de la falla fue de la siguiente forma:

- Aparición de grietas en el pavimento de la calzada sur de la calle 72.
- Agrietamiento y desmoronamiento de concreto de los pilares huecos al nivel del cuarto sótano.

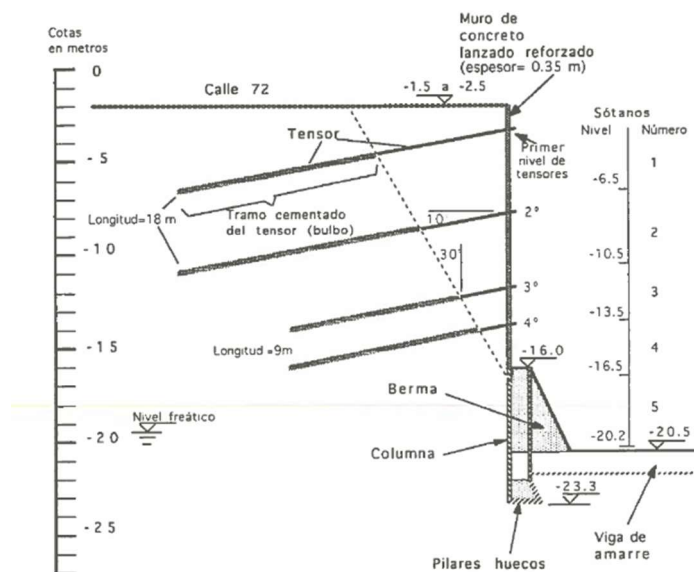


Figura 29. Configuración del Muro colapsado en la calle 72 en 1994

- Posteriormente se escucharon ruidos de rotura del concreto a nivel de la cresta de la berma.
- Se observa hacia las 2 p.m del 9 de mayo de 1994 desplazamiento del suelo en el pie del talud y hundimiento súbito del andén y parte de la calzada de la calle 72.
- Posteriormente el muro colapsa por arrastre de su parte inferior hacia el sur y cae sobre la gran masa de suelo hundida.
- La pata del deslizamiento llega a la estructura en construcción y tumba columnas y encofrados cercanos.

De la información que analizó la comisión investigadora establecieron que el basamento rocoso (Formación Bogotá) se encontraba profunda ( a más de 22 m) y el perfil superior podría constar de 4 a 7 m de limos y arcillas; 8 m de arenas y gravas y unos 3 m de bloques. Por otra parte la estratigrafía de las prospección con cono estático propuso 1 m de suelo orgánico, 7 m de arenas , limos y algo de gravas y 1,20 m bloques y gravas. No se encontró nivel de agua libre estable.

Por otra parte la comisión investigadora en su reporte menciona que recibieron datos de mediciones topográficas de desplazamientos horizontales del muro colapsado, con información desde noviembre de 1993 a abril 26 de 1994. Los movimientos correspondieron a medidas de la cresta del muro con desplazamientos oscilantes que variaron entre -15 a +13 mm, con un total relativo máximo de 25 mm. Indicaron que no conocieron datos de medición de otros puntos fuera de la cresta ni de inclinómetros ni de deformímetros.

La comisión indicó que en el sitio del derrumbe antes del evento no había sondeos y los más cercanos tenían una profundidad escasa. Además no se conocían los espesores y materiales del perfil, ni habían ensayos de laboratorio de resistencia o deformabilidad en las profundidades requeridas. En consecuencia definieron realizar un pozo exploratorio y ensayos de laboratorio. De esa exploración indicaron que el perfil se caracterizaba por una compleja secuencia de materiales diferentes incluyendo el pavimento asfáltico y la base de la calle 72 cuyos dos materiales eran hasta de 0.81 m. Luego identificaron 27 suelos. El perfil se caracterizó por materiales sedimentarios desde canto hasta arcillas, en espesores variables, desde 0.05 hasta 2m. También se observaron rastros de oxidación a lo largo del perfil geológico y las arcillas fueron de baja plasticidad. El nivel freático en el pozo de exploración se encontró a 16.80 m de profundidad. También identificaron dos capas acuíferas naturales activas, con surgencia de agua, aún después del derrumbe: uno a 13.80 m de profundidad en un manto de gravas y otro a 7.20 m de profundidad en una capa de arena fina.

En la profundidad de 8.5 m a 11.50 m detectaron un manto grueso de cantos y gravas limpios y compactos, con una permeabilidad alta donde estimaron que podía correr agua subterránea intermitente.

Del análisis de la comisión investigadora se encontró que el diseño de la pantalla atirantada se realizó para un perfil de suelos homogéneo y seco, con parámetros equivalentes a los de gravas arenoso- limosas. El perfil estratigráfico real del sitio del derrumbe fue diferente al de diseño, puesto que a partir de los 11.5 m de profundidad el suelo predominante fue arcilloso(menos resistente y menos rígido). En consecuencia los bulbos del sistema de anclajes del 4º nivel no resistieron los empujes y se inició un proceso de deformación excesiva del conjunto de sostenimiento. Una vez falló la parte inferior del sistema de contención, la parte superior del talud se desplazó hacia abajo.

#### 2.2.24.4. BENCHMARK (experiencias internacionales)



##### 2.2.24.4.1. LÍNEA 12, METRO DE CIUDAD DE MÉXICO

Es un sistema que se integra por un trazado de 26 km de longitud y 20 estaciones de distintas tipologías, que representó un gran reto en la ingeniería Mexicana, debido principalmente a la presencia de suelos heterogéneos de muy mala calidad.

La Línea 12 atravesó desde suelos arcillosos blandos típicos del valle, con altos contenidos de agua, alta plasticidad y baja resistencia, pasando por la zona de transición, hasta la zona de Lomas con suelos limo-arenosos más compactos (Benamar, I, 2012). Por otro lado, en Ciudad de México, existe una fuerte restricción por la conservación de construcciones con patrimonio histórico. Por lo anterior, el método constructivo implementado debía ser monitoreado para no afectar la cimentación o las estructuras de construcciones adenañas a la línea de Metro. Adicionalmente, las obras del metro debían cumplir con todas las restricciones sísmicas para estructuras especiales, dado que la Ciudad de México se encuentra en una zona de alto riesgo de amenaza sísmica.

Debido al tipo de suelos que atraviesa el túnel, desde suelos blandos arcillosos con alto contenido de agua y alta compresibilidad hasta suelos limo-arenosos compactos e incluso gravas y boleas de grandes dimensiones, el método de excavación elegido fue por medio de un escudo de presión de tierras balanceadas (EPB – Earth Pressure Balance) que permitió equilibrar las presiones del terreno en el frente de excavación por medio de la presión que mantenía el material excavado dentro de la cámara de corte del escudo y de esta forma disminuye las perturbaciones dentro del suelo y hacia la superficie, así como a las estructuras vecinas al trazo del túnel.

En su parte inicial, el túnel se encuentra con una estratigrafía compuesta principalmente por suelos blandos arcillosos con altos contenidos de agua, alta plasticidad y baja resistencia intercalados por lentes de arena y ceniza volcánica. Por encima de estas arcillas blandas se encuentra un estrato de arcilla arenosa de consistencia firme y más arriba la costra o relleno superficial de materiales arenosos-limosos. Bajo el estrato arcilloso en el que corre el túnel se encuentran los depósitos profundos de limos arenosos y arenas con gravas aisladas. Al avanzar hacia el poniente, el túnel se introdujo en los depósitos profundos de arenas limosas, limos arenosos y arenas con gravas aisladas. En su tramo intermedio, el perfil ascendente de los depósitos profundos hizo que el túnel quedará embebido en su parte inferior en estos depósitos más duros. Hacia el final del trazo, el túnel fue en su totalidad excavado en los limos y arenas de la zona de Lomas, encontrando a su paso incluso bolos de grandes dimensiones, cuyo manejo fue parte de las premisas del diseño del escudo.

Es importante mencionar que los estratos arcillosos en los que se desarrolló el túnel en su tramo inicial estaban sujetos, como el resto del subsuelo arcilloso de la Ciudad de México, a la consolidación regional por la extracción de agua. Dentro de la información recabada durante la campaña de investigación geotécnica se encontró el nivel de aguas freáticas entre 2 y 3 m de profundidad. De este nivel y hasta profundidades de alrededor 11 a 15 m, la distribución piezométrica es la hidrostática. A profundidades mayores, las curvas piezométricas mostraron abatimiento hasta alcanzar los depósitos profundos donde la presión de poro fue prácticamente nula.

Con el perfil estratigráfico del túnel establecido y los parámetros geotécnicos de los diferentes estratos definidos, se realizaron cálculos previos al inicio de la excavación para estimar los valores de presión frontal a aplicar durante la fase de excavación con la tuneladora EPB y los asentamientos máximos previsibles en superficie siguiendo lo indicado en (Attewell et al., 1982) y (Kolymbas, 2008).

Debido a que en los terrenos que atraviesa el túnel predominaron los finos, se recomendó el uso de una tuneladora tipo EPB. En la parte final del túnel, hacia el oeste, prevalecían los terrenos granulares, pero la tuneladora EPB podía lidiar con estos terrenos mediante el uso de aditivos condicionantes del terreno. El bicomponente fue una mezcla de dos líquidos: líquido A, una lechada que a su vez es una mezcla de agua, bentonita y cemento, y puede contener un aditivo retardante; y líquido B: un aditivo acelerante. La inyección de la mezcla bicomponente en el espacio anular se realizó de manera simultánea a la excavación a lo largo de todo el túnel. Se inyectó alrededor de los anillos que iban saliendo del faldón del escudo.

Las principales características de la máquina tuneladora EPB fueron:

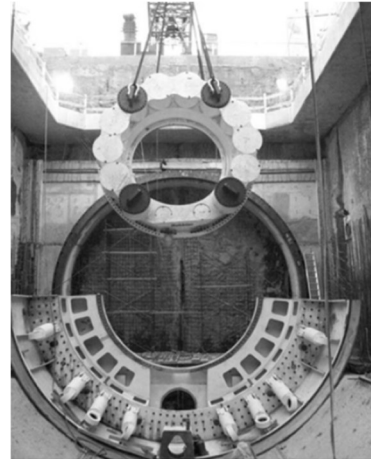
- Diámetro de excavación = 10.20 m

- Diámetro interior del revestimiento=9.11 m
- Longitud total escudo + back up=108 m
- Empuje máximo=8400 Ton
- Torque máximo=20300 kN.m
- Potencia eléctrica instalada=5000 kVA
- Capacidad de rezaga=360 m3/h
- Peso total=1100 Ton

El proceso completo de montaje y prueba de la tuneladora en el sitio de obra tomó 2.5 meses, que se consideró dentro del promedio de tiempos de ensamble de tuneladoras similares. Véase proceso de ensamble del escudo en la Figura 30.

La lumbrera de ensamble de la tuneladora está situada entre dos estaciones y fue estructurada mediante muros Milán; es rectangular de 34 m de largo, 14 m de ancho y 17 m de profundidad. Este pozo permitió el ensamble en su fondo del escudo y del primer remolque del backup que contiene en particular el segundo tornillo sin fin, la cabina de operación de la tuneladora y las unidades hidráulicas. El resto de los remolques del back up (6) fueron ensamblados en superficie y conectados al escudo mediante “cordón umbilical” constituido por una serie de mangueras y cables eléctricos que permitieron el inicio de la excavación con los 6 remolques del back up en superficie. A medida que avanzaba el escudo en el terreno se pudieron bajar los remolques por parejas y seguir así avanzando hasta que se completó toda la tuneladora dentro del túnel.





a. Proceso de ensamble del escudo



b. Proceso de ensamble

Figura 30. Proceso de ensamble de la máquina EPB - Benamar(2012)

De acuerdo con lo anterior, fué necesario ejecutar un diseños con estructuras a nivel, elevado, entre pantallas y subterráneo tipo túnel profundo.

El tramo de túnel excavado con escudo EPB inicia en la zona de Mexicaltzingo, donde la línea toma dirección hacia el poniente, y finaliza antes de llegar a la zona de Mixcoac, en la estación Insurgentes Sur. En el tramo donde inicia el túnel se encuentran también depósitos lacustres que, aunque de menor espesor, siguen correspondiendo a Zona de Lago. Conforme el túnel avanzó hacia el poniente, los estratos arcillosos disminuyeron en su espesor y el túnel entró en la Zona de Transición (zona II), para finalmente llegar a la Zona de Lomas.

Para la construcción de tramos entre pantallas se implementó el método Cut and Cover (método invertido), cuyos muros funcionaron como muros de contención durante y después de la construcción. Debido a las malas condiciones del suelo se requirió la construcción de pilas secantes.

En cuanto a la construcción del túnel, las profundidades oscilaron entre los 7 y 14m, para lo cual se seleccionaron dos alternativas. Por un lado, en aquellas zonas con presencia de suelos arcillosos o limo arcillosos, se utilizó una tuneladora EPB, de 10.10 m de diámetro de excavación y 9.11 m de diámetro interior para alojar un túnel revestido con dovelas prefabricadas de concreto (aprox. con dovelas de 50 cm de espesor). Dado que la tuneladora se debía diseñar para las condiciones de un suelo extremadamente complicado, el

diseño del escudo, los accesorios y el ensamblaje de la máquina duró alrededor de un año, donde las piezas se construyeron en catorce países distintos y finalmente se ensamblaron en el sitio de la construcción. En las zonas con presencia de suelos rígidos se utilizó el método de excavación NATM.

Entre los factores considerados durante la excavación del túnel, fué la extracción de agua y la sismicidad, razón por la cual, se implementó el túnel de dovelas, el cual ofreció ventajas en ambas situaciones, debido a que su estructura contó con juntas a distancias determinadas, para que su comportamiento en relación con los elementos mecánicos o fuerzas que actuaran sobre él, no fueran lo mismo que si se tratara de una estructura rígida.

En cuanto a las dovelas debido a que las condiciones por las que atravesó la tuneladora, fueron considerablemente distintas y se requirió utilizar un armado diferente con respecto a la cantidad de acero. Aquellas zonas donde el suelo era blando, con altos contenidos de humedad, requirió un armado mucho mayor. Por el contrario, donde el suelo era mucho más firme, se empleó apenas el mínimo de acero requerido por los reglamentos.

Igualmente fue importante considerar que al momento de la excavación, el suelo tenía que ceder, lo que podía resultar que la tuneladora quedará atrapada. Con el fin de evitar esto, la cabeza de corte de la máquina se diseñó más grande que el resto del cuerpo del escudo. A su vez, para el espacio que quedaba entre la cabeza de corte y la cara exterior del túnel, la máquina contó con un sistema que inyectó una mezcla “de componente” para rellenar. De no haber hecho esto, el espacio se podría cerrar, provocando asentamientos en superficie. Este relleno contribuyó igualmente a que la presión del suelo se distribuyera de manera uniforme sobre el anillo. En la Figura 31 se presenta un detalle de la máquina EPB utilizada en la Línea 12 del Metro de México. El sistema correspondió a un mono túnel.



Figura 31. ICA. (2012). Infraestructura línea 12 del metro. Vector de la ingeniería civil. Ciudad de México, México.

Debido a las condiciones tan complejas en las que se está excavando el túnel de la línea 12: terreno poco competente, bajas coberturas, en zona urbana y con la presencia de estructuras sensibles; se elaboró un extenso plan de instrumentación a lo largo del trazo del túnel que incluyó mediciones en superficie y en profundidad, en el terreno y en las estructuras potencialmente afectadas incluyendo el propio túnel.

El plan de instrumentación se dividió en dos partes:

a) Instrumentación convencional a lo largo del trazo del túnel que incluye: referencias superficiales sobre el eje del túnel, referencias transversales al eje del túnel, medición de convergencias en el túnel, referencias en todas las fachadas de edificaciones vecinas al trazo del túnel y medición de inclinación de todos los edificios de más de 3 pisos adyacentes al trazo del túnel. b) Instrumentación detallada, enfocada en estructuras sensibles o secciones representativas del trazo, que incluye: inclinómetros, extensómetros, piezómetros, piezo-celdas, celdas de carga en las dovelas del revestimiento, medición de convergencias automatizadas dentro del túnel y clinómetros en las estructuras sensibles.

Los asentamientos máximos a lo largo del eje de trazo fueron iguales o menores a los calculados sin afectar las estructuras vecinas y las convergencias dentro del túnel siendo limitadas a un máximo de 0.2% del diámetro interior del túnel.

La instrumentación detallada fue instalada estratégicamente en las siguientes cinco secciones: a) Iglesia de San Marcos Mexicaltzingo: Paso del eje de la tuneladora a 10 m de una iglesia del siglo XVI con cimentación superficial b) Cruce Churubusco: Paso del túnel bajo el colector Ejido de 4 m de diámetro, bajo el entubamiento del Río Churubusco y entre las pilas de cimentación de cuatro columnas del puente vial. La distancia entre el techo del túnel y la base del colector fue de 4 m. La distancia mínima entre el túnel y las pilas de los apoyos del puente fue de 5 m. c) Cruce Tlalpan: Paso del túnel bajo la línea 2 del Metro, la cual es superficial en este tramo, con una cobertura de apenas 8 m y cruce bajo el paso

deprimido vehicular con una cobertura de apenas 6 m. d) Cruce Tokio: Paso del túnel bajo edificaciones de 1 a 3 niveles con cimentación superficial y en un caso con un nivel de sótano. Paso del túnel a una distancia mínima de 60 cm de las pilas de cimentación de un edificio e) Cruce Zapata: paso del túnel bajo la línea 3 del Metro la cual está en un cajón somero con una cobertura de 3 m.

A pesar de la complejidad de estos cruces, después de realizar análisis numéricos de interacción suelo-estructura para simular el paso de la tuneladora, se concluyó que llevando un control riguroso de los parámetros de avance, las deformaciones que iban a ser generadas no ocasionarían desperfectos a las estructuras. Por tanto, no fue necesario realizar trabajos de refuerzo del terreno alrededor de estos cruces antes del paso del escudo.

A la tuneladora tipo EPB se le acondicionaron algunos complementos necesarios para llevar un mejor control de las deformaciones en las condiciones adversas de excavación de este túnel. El método de rezaga utilizado inicialmente fue el bombeo, debido a que el material excavado eran suelos finos blandos. Sin embargo, conforme avanzó la excavación y el escudo se encontraba con suelos con mayor contenido de arena y menor humedad, fue necesario implementar el sistema de banda transportadora para la rezaga desde el frente.

A lo largo del tramo excavado, la tuneladora se encontró cerca de varias estructuras y cruces sensibles entre los cuales sobresale el cruce Churubusco, con el puente y río del mismo nombre y el Colector Ejido, y el cruce bajo el cajón de la Línea 3. En ambos casos, fue imperativo colocar instrumentación detallada cómo monitorear de manera continua para observar y minimizar los efectos sobre las estructuras cercanas, y de igual forma en ambos casos los resultados fueron satisfactorios.

#### *2.2.24.4.2. METRO DE TURÍN: MONITOREO DE LA EXCAVACIÓN CON EPBM*

A finales de abril de 2008, una máquina con EPBM con escudo comenzó la excavación del lote 2 del metro de Turín. El proyecto correspondió con la ampliación de la línea ya existente hacia la parte sur de la Ciudad, conectando las estaciones de tren de Porta Nuova y Lingotto. Para esta nueva línea, se construyó un túnel sencillo de doble vía, con 6,8 m de diámetro interior, con una longitud total de aproximadamente 2,9 km.

La zona de Turín se extiende en un semiplano formado por abanicos aluviales al final de los valles alpinos. Estos abanicos de depósitos aluviales-glaciales han sido moldeados por los ríos que atraviesan la zona (Stura, Dora, Riparia, Sangone). Las unidades predominantes a lo largo del alineamiento del túnel son formaciones recientes compuestas por arena, grava y guijarros dispersos en una matriz limosa. Estas formaciones gruesas presentan una alta permeabilidad (10-3 a 10-4 m/s) y diferentes grados de cementación, como resultado de un proceso de sedimentación aleatorio (algunos lentes de conglomerados naturales pueden presentar valores de UCS de alrededor de 7-15 MPa). La perforación de túneles bajo zonas urbanas en este tipo de geología fue una tarea difícil, en particular con una máquina de escudo EPB.

#### 2.2.24.4.2.1 Rendimiento y Producción

Los problemas y la baja producción fueron experimentados durante la etapa inicial. Durante el periodo mencionado se excavó un total de 213 m de túnel, lo que supuso una producción media de 2 m al día (el 20% de lo estimado). La referida baja producción se pudo explicar por las numerosas paradas y averías que se produjeron durante ese periodo. Se extrajeron dos conclusiones de este caso: la máquina pasó gran parte del tiempo parada (factor de utilización del 9,5%) y durante largos periodos de tiempo (más de 13 horas de media). Las paradas y averías tuvieron diferentes orígenes y motivos, a saber: a) desmontaje del bastidor de reacción de acero, b) montaje de los vagones de reserva restantes (parada importante); c) problemas de disponibilidad de zonas de eliminación de lodos, d) varias paradas para vaciar parcialmente la cámara de excavación y limpiar el cabezal de corte; e) bloqueo de las líneas de grouting.

#### 2.2.24.4.2.2. Extracción de Lodos

El peso o el volumen de lodo extraído fue uno de los parámetros más importantes a controlar. Las tuneladoras modernas son capaces de extraer grandes cantidades de material en poco tiempo. Si no se controla la extracción de escombros, es fácil que se produzca un exceso de excavación y se produzcan hundimientos en la superficie o incluso socavones. Al controlar este parámetro, es muy importante evaluar el peso unitario del suelo in situ, así como cotejar las mediciones con diferentes instrumentos. En el presente proyecto este control se realizó mediante una sola cinta transportadora.

#### 2.2.24.4.2.3. Relleno de Grouting

El grouting de relleno es esencial para garantizar que el espacio anular, entre el perfil de la excavación y las dovelas, se rellena completamente. Se reconoció que el grouting de relleno desempeñó un papel importante en la magnitud de los asentamientos superficiales. En ese sentido, es tan importante como la presión de la cara en el control del hundimiento de la superficie. Por lo tanto, se debe controlar estos aspectos con el mismo cuidado. Se debe realizar directamente desde la cola del escudo y simultáneamente con el ciclo de excavación, utilizando un número razonable de líneas para asegurar un relleno homogéneo. El control se debe hacer tanto en términos de presión como de volumen para asegurar el llenado completo del hueco. La presión se suele ajustar ligeramente más alta (alrededor de 0,5 bares más) que la presión de la cara, para garantizar que el agua y/o la lechada dentro del espacio anular sean repelidos y sustituidos por el grouting.

#### 2.2.24.4.2.4. Acondicionamiento del Suelo

En cuanto al acondicionamiento del suelo, es importante mencionar que se realizó un fuerte acondicionamiento, prácticamente sólo con el uso de espuma seca (FIR=136% Y FER=9. valores promedio). Como resultado de ello, se produjeron algunos problemas operativos en relación con la extracción, el transporte y la extracción de lodos. Además, la presión de la cara de excavación era difícil de mantener debido a la segregación de los escombros dentro de la cámara. La segregación del lodo originó la acumulación de la fracción más gruesa en la parte inferior de la cámara, lo que generó elevados esfuerzos efectivos y, en consecuencia, un alto torque y desgaste. En la parte superior, debido a su fluidez, el lodo se podía infiltrar fácilmente en el suelo permeable y, por tanto, dificultaba la aplicación de la presión efectiva requerida.

#### 2.2.24.4.3 LÍNEA 1 DEL METRO DE QUITO

La línea de metro de la ciudad de Quito en Ecuador, dispone de un monotúnel que permite la circulación de trenes sobre vías de ancho 1,435 m. La longitud de la primera línea del metro de Quito es de 22.076,5 m (incluyendo estaciones), en el que se dispone la implantación de 15 estaciones de Metro, y 5 zonas de reserva para la ejecución de futuras estaciones, 10 salidas de emergencia, 13 pozos de ventilación y 10 pozos de bombeo. La longitud del túnel excavado con tuneladora (EPB) fue de 19.200 m, y con el sistema cut & cover se realizaron cerca de 1091,7 m y en cielo abierto de 122,9 m.

La tuneladora realizó la excavación del túnel a una profundidad promedio de 20 a 25 m, a través de una geología mixta que comprende: limos, arcilla y toba volcánica.

Para el túnel excavado con tuneladora se utilizaron tres (3) tuneladoras tipo EPB (Earth Pressure Balance) de la marca Herrenknecht, dos (2) tuneladoras nuevas y una (1) reacondicionada. Las dos tuneladoras nuevas tuvieron un diámetro de excavación de 9,4 m cada una, con una velocidad máxima de avance de 100 mm/min. La tuneladora reacondicionada tuvo un diámetro de excavación de 9,37 m, con una velocidad máxima de avance de 80 mm/min. En la Figura 32, se presentan las máquinas EPB utilizadas en el Metro de Quito.



Figura 32. Máquinas EPB utilizadas en el Metro de Quito

El avance promedio de excavación de la tuneladora nueva S-1018 (La Guaragua) en el tramo entre el Labrador y La Pradera (4.482,68 m), fue de 31,13 m/día, con rendimientos más altos (128%) que los esperados en el mismo tramo de 13,63 m/día.

En el sector Sur, las correlaciones estratigráficas realizadas por medio de los sondeos, permitieron determinar que los depósitos fluvio-lacustres El Pintado, se extendieron desde el sector de Chillogallo, y que a partir del sector El Calzado, estos depósitos se hicieron más potentes hacia el norte. Estas correlaciones también permitieron establecer que el contacto entre la Unidad Fluvio – Lacustre El Pintado y la Unidad Volcanosedimentaria Guamaní correspondía a un cambio transicional.

En el sector norte de la cuenca, a partir del Panecillo, en el perfil de la línea del metro, predominó la presencia desde abajo hacia arriba de la Formación Cangahua, conformada por limos arenosos, típicamente de colores amarillentos a marrones, generalmente intercaladas con caídas de cenizas, pómez, paleosuelos y algunas veces, flujos de lodos y canales aluviales. En la denominación Cangahua, se incluyeron depósitos de conos aluviales que se desprendieron de las estribaciones orientales del volcán Pichincha.



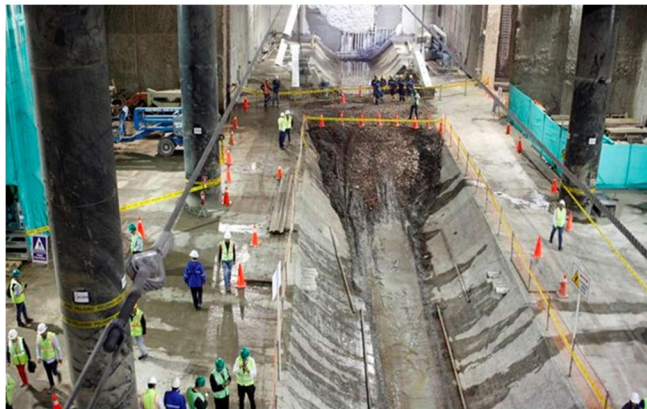


a. Sistema de ventilación



Tuneladora "La Guaraqua" avanza con la construcción del túnel.

b. Línea metro de Quito- Mono túnel



c. Detalle por paso de estación



d. Detalle de paso de la máquina EPB



Figura 33. Detalles del Metro de Quito- Mono Túnel



#### 2.2.24.4.4 LÍNEA 2 DEL METRO DE LIMA

La ciudad de Lima Metropolitana, se asienta principalmente en el cono aluvial del río Rímac, y se extiende hasta tocar el valle del río Lurín por el sur, y el valle del río Chillón por el norte. La mayor parte de la futura Red del Metro de Lima (RML) ocuparía la zona central del cono aluvial del río Rímac, la misma que está compuesta por una grava muy compacta sin presencia del nivel freático (NF) en la profundidad de interés (<50m), y que es homogénea en su granulometría, pero no necesariamente en su capacidad mecánica. Los bordes del cono aluvial (Callao, Chorrillos) están compuestos por un material más heterogéneo –además de arena SM y arcilla CL– y en estado menos compacto.

La línea 2 del metro de la ciudad de Lima tiene una longitud de 26,9 km, siendo excavados por medio de una tuneladora EPB, con un diámetro de excavación de 10,27 m, con un avance de excavación estimado de 13,0 m/día. Fabricante Herrenknecht.

#### 2.2.24.4.5. LÍNEA 9 DEL METRO DE BARCELONA.

La línea 9 del metro de Barcelona se inauguró parcialmente en 2009, actualmente se encuentran algunos tramos en construcción. Tiene una longitud de más de 48 km y 52 estaciones. El túnel se excavó de 25 a 50 m de profundidad. La construcción se realizó por sectores:

- 25,6 km en diámetro de 12 metros con máquina EPB y TBM.
- 14,0 km en diámetro de 9,4 metros con máquina EPB.
- 5,0 km con el sistema cut & cover.
- 3,0 km en viaducto.

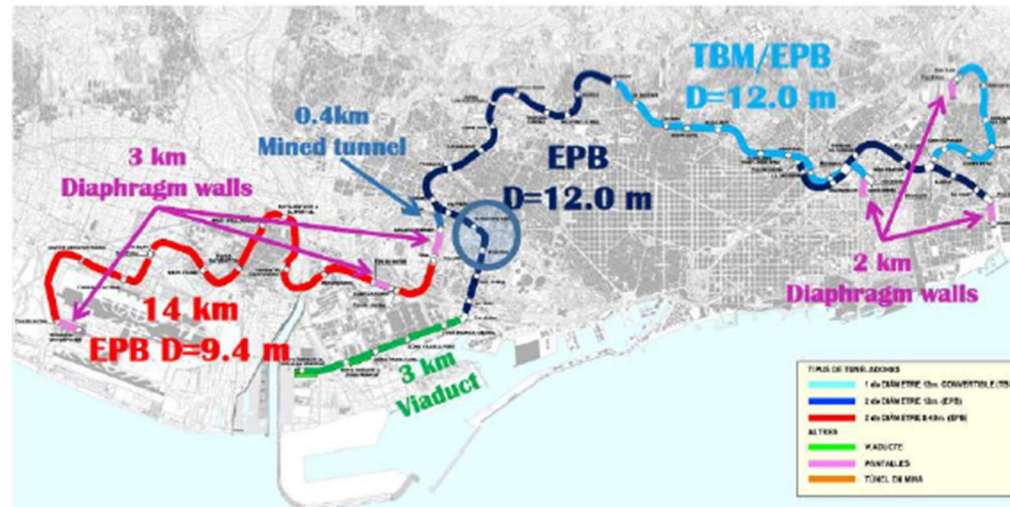


Figura 34. Sectores de la L9 de Barcelona

Desde el punto de vista geológico, el área de Barcelona se divide en tres grandes sectores: una zona de rocas graníticas, una zona de rocas blandas compuesta por conglomerados, con arcillas sobreconsolidadas y gravas, y una zona del cuaternario compuesto por depósitos aluviales. Véase Figura 35.

En la Figura 36, se presenta un detalle de la máquina EPB utilizada en el metro de Barcelona.

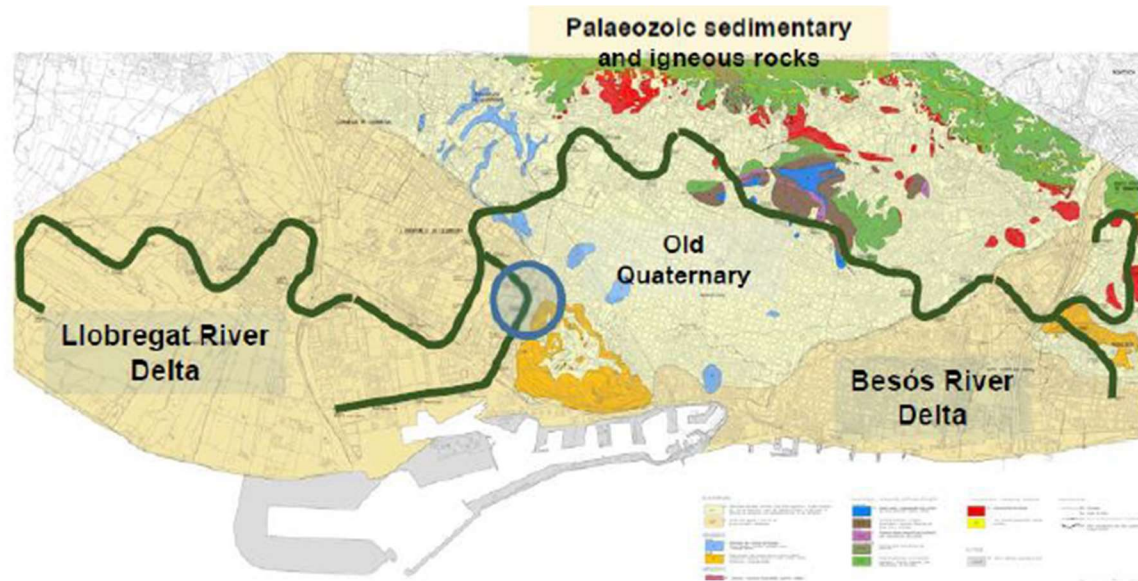


Figura 35. Planta geológica del área de Barcelona.



Figura 36. Maquina EPM utilizada en el Metro de Barcelona

Los materiales cuaternarios incluyen capas de gravas, arcillas parcialmente saturadas, materiales arenosos y conglomerados calcáreos débiles. Los depósitos aluviales están compuestos principalmente por arenas y arcillas blandas y limos. Una capa profunda de grava, que constituye un acuífero intensamente explotado, generalmente subyace a los suelos más blandos.

El túnel fue de 12 m de diámetro (113,1 m<sup>2</sup>), el cual se adoptó para la mayor parte de la longitud de la línea (25,6 km), en el cual, se colocaron hasta cuatro pistas en dos niveles diferentes en el túnel.

El túnel de 12 m de diámetro utilizó un tipo de anillo de revestimiento segmentado que está compuesto por seis tramos de hormigón armado (refuerzo de acero + fibras de acero) y un segmento cuña (6 + 1). El grosor de los segmentos fue de 40 cm y estos miden 1,8 m de largo.

#### 2.2.24.4.6. LÍNEA 4, METRO RIO DE JANEIRO

Para la construcción del tramo Sur de la línea 4 de Río de Janeiro de 5,2 km, se utilizó una máquina tuneladora EPB, con 6 métodos de operación:

- Modo abierto 1: Cámara frontal abierta que traslada el material directamente por la cinta transportadora. Únicamente para macizos rocosos de buena calidad.
- Modo abierto 2: Cámara frontal abierta con tornillo sinfín, capaz de trabajar en macizos poco estables con poca presencia de agua. Se instalan todas las líneas de inyección de polímeros o lodos bentónicos para tratamientos del terreno. Este proceso toma alrededor de 10 días.
- Modo de transición: Cámara frontal parcialmente abierta con aire comprimido en la mitad superior de la cara. Se puede utilizar en materiales estables con flujo de agua.
- Modo EPB 1: Cámara frontal completamente cerrada y presurizada para trabajar bajo el nivel freático. (Método EPB tradicional)
- Modo EPB 2: Se instaló un pistón en el extremo del tornillo sinfín que transporta el material fluido a la cinta transportadora a través del pistón.
- Modo EPB 3: En presencia de material extremadamente fluido, se bombeo el material a la superficie, ya que este no pudo ser transportado por la cinta transportadora.

Las principales complicaciones se debían a que el suelo por donde pasó la línea 4, está compuesto principalmente por una mezcla de arena de playa y roca. Adicionalmente, todo el trazado se encontró muy cercano a las zonas más valorizadas de Río de Janeiro. Por esa razón, había un riesgo permanente durante la construcción, por lo cual, para proteger las fundaciones de los edificios se instalaron cortinas de jet-grouting. Además, la línea 4 del metro de Río de Janeiro tuvo un plazo de entrega inaplazable, ya que la construcción debía finalizar antes del inicio de los juegos olímpicos de 2016.

Al inicio de la obra atravesaba por un macizo rocoso, por lo que para la operación únicamente se instaló un sistema anti giro y un sistema de soporte para que la máquina no comenzará a girar. Adicionalmente, se instaló un sistema de monitoreo con Strain Gauges para controlar las deformaciones en el frente de excavación. A medida que se iba avanzando en la excavación y el perfil estratigráfico comenzaba a cambiar, se fueron alternando los modos de operación de la tuneladora. El monitoreo durante la obra fue muy importante ya que la cantidad de agua y el tipo de material encontrado, permitió determinar hasta donde fue necesario proyectar la utilización de un modo u otro.

Para cruzar la zona de transición entre el suelo arenoso y la roca, se instalaron cortinas de jet grouting verticales, de alta resistencia, para compensar las propiedades geomecánicas del macizo rocoso y pasar la tuneladora sin desestabilizar el suelo. Sin embargo, durante el proceso, el suelo en la zona de transición bajo el bloque de tratamiento, se desintegró e hizo que la superficie se hundiera. A pesar de esto, las cimentaciones de las estructuras vecinas no se vieron afectadas. Para retomar las actividades se aplicaron métodos para mejorar las condiciones del suelo como: Inyecciones de compactación, lechada de cemento y se instalaron pozos de abatimiento del agua para reducir la presión hidrostática. Estas soluciones fueron implementadas nuevamente en distintos puntos del trazado a medida que avanzó la obra.

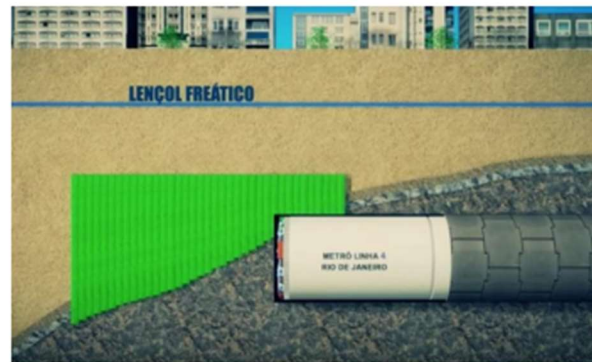


Figura 37. Zona de transición entre macizo rocoso y arenoso

Otra complicación importante se dio en la estación Jardim de Alah, la cual se encontraba muy cercana al canal que conecta la laguna de Freitas con el mar. Para llevar a cabo este proceso, se construyeron diques en cada lado del canal y se instaló un sistema de jet-grouting, para pasar la tuneladora sin interferir con el curso del canal. Sin embargo, existía la preocupación de que el bloque de tratamiento de jet-grouting fallara nuevamente y el agua del canal se infiltrara en el cajón de la estación. Por lo tanto, se propuso llenar mitad del cajón con agua extraída del canal para evitar el flujo de agua y así equilibrar las presiones entre el interior y el exterior de la estación. La tuneladora ingresó a la estación, totalmente sumergida y al terminar el proceso, se bombeó el agua al canal. Este mismo procedimiento se utilizó para la estación Antero de Quental, donde no fue posible rebajar el nivel freático y, por esto, se sumergió nuevamente la tuneladora para no comprometer el cronograma de la obra.

#### 2.2.24.4.7. METRO DE BAKÚ AZERBAIYÁN

La línea violeta del metro de Bakú, tiene una longitud aproximada de 20 Km y consta de 12 estaciones, la estructura cuenta con dos túneles paralelos de 6.3m de diámetro excavados con el método EPB, iniciando obras en agosto del 2011.

En cuanto al entorno geológico se demarcan estratos geológicos predominantes que están formados por arcillas, encontradas en formaciones neógenas más antiguas, algunas de las cuales tienen más de 100 m de espesor. Además, se presentaron capas de arena de diversos espesores, cerca del mar Caspio y estratos de piedra caliza y arenisca de espesor variables.

En cuanto al túnel este fue revestido con segmentos de concreto reforzado de 0.3m de espesor. Sin embargo, se implementaron segmentos diferentes para cada tubo de túnel debido a que son excavados con máquinas de diferente proveedor. La longitud de los anillos para los túneles de oriente y occidente fueron de 1.5 y 1.2m respectivamente .

En el túnel oriental se implementó una máquina fabricada por Robbins, mientras que el túnel occidental se excavó con una máquina Herrenknecht. En ambos casos, las máquinas fueron del tipo EPB, óptimas para las arcillas rígidas que se encontraron a lo largo de la línea. Sin embargo, estas son más difíciles de controlar a través de los bancos de piedra caliza presentes y las capas de arenisca acuífera ubicadas debajo del nivel freático.

En cuanto a las presiones de frente de estas máquinas se menciona que fueron de hasta 4.5 bar y 5.0 bar en el escudo Herrenknecht y el escudo Robbins, respectivamente. Sin embargo, debido a las grandes profundidades de conducción bajo los niveles freáticos, las tasas de avance promedio fluctuaron entre los 10 y 20 m por día, y en los casos de condiciones geológicas complicadas, se alcanzaron velocidades de solo 4 m por día.



#### 2.2.24.4.8 LÍNEA METRO 1 , PANAMÁ

La línea 1 del metro de Panamá originalmente tenía una extensión total de 15,7 km y 14 estaciones. Sin embargo, antes de finalizar la fase 2 del proyecto se ordenó la extensión del tramo elevado y la construcción de una estación subterránea adicional. La estructura se distribuye en 7,2 km subterráneos, 7,3 km en viaducto y 1,3 km entre trinchera. La línea se construyó en dos etapas que finalizaron en 38 y 26 meses respectivamente

Se usaron 2 tuneladoras tipo EPB -en la cual se varió la fuerza de empuje de avance y la velocidad de extracción del tornillo para controlar la presión del balance de tierra y garantizar así la estabilidad de tierra y minimizar los asentamientos en superficie para los 7 km de túneles. El diámetro externo de las tuneladoras era de 9,7 m para una vía de dos carriles.

Los diseños conceptuales y las especificaciones técnicas de la L1 de Panamá se desarrollaron en 4 meses. Para finalizar la excavación de la sección subterránea, en 13,5 y 9 meses, se utilizaron 2 tuneladoras EPB con anillos de dovelas prefabricados, que se ubicaron en ambos extremos de la línea para ir avanzando hacia el centro y así, no detener la excavación en ningún momento. Adicionalmente, antes de comenzar la construcción ya se había especificado la ubicación del parque de dovelas y se había ordenado el retiro de todas las redes de servicios públicos que pudieran interferir con el trazado.

Cada tuneladora empezó a trabajar desde los extremos de la línea, dirigiéndose hacia el punto central entre ellas. Una tuneladora excavó 3.990 metros en 13,5 meses y la otra tuneladora excavó 3.032 metros en nueve meses, de forma simultánea. La máquina 1 inició el montaje en noviembre de 2011 y excavación en febrero de 2012 y la máquina 2 inició



montaje en enero de 2012 y proceso de excavación en abril de 2012. Las dos excavaciones se encontraron en la Iglesia del Carmen. La máquina 1 llegó a este punto en marzo de 2013 y la máquina 2 en diciembre de 2012. En la Figura 38 se observa detalle de la Línea 1 del Metro de Panamá.



Figura 38. Sección Tipo Línea metro 1 de Panamá- Mono túnel

Se construyeron cinco pozos de evacuación y ventilación –que se construyeron en paralelo a las estaciones subterráneas- los cuales jugaron un papel importante en la seguridad de este tipo de estructura, ya que sirven en caso de emergencia para la evacuación de los trabajadores. Se construyeron de forma simultánea al avance de la excavación.

Se emplearon cuatro hidro fresadoras de forma simultánea para la ejecución de pantallas en las estaciones subterráneas y trincheras, cada una ocupándose de dos frentes de trabajo.

Para la construcción de las estaciones se emplearon vigas prefabricadas de concreto a fin de acelerar la construcción de los cajones de las estaciones. El proceso constructivo fue:

- Construcción de las pantallas laterales.
- Se excavó hasta una profundidad de 5 metros y se instalaron las vigas prefabricadas.
- Continuó la excavación hasta el punto donde se ubicó, la losa de fondo, construida con sección semicircular para que la tuneladora pueda atravesar la estación sin ningún inconveniente.



- Se procedió a construir cada uno de los niveles de la estación.

Las estaciones en promedio tuvieron las siguientes dimensiones:

- Profundidad: 25 m.
- Longitud del cajón: 117 m.
- Longitud andén: 105 m.
- Ancho: 19 – 21 m.
- Excavación: 50.000 m<sup>3</sup>.
- Muros colados: 7.000 m<sup>2</sup>.

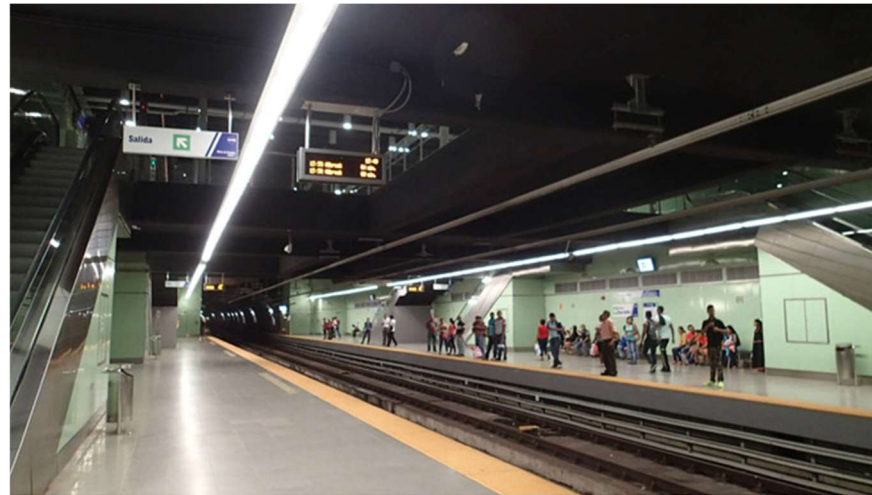


Figura 39. Estación típica - Línea 1 Metro de Panamá



#### 2.2.24.5. CONCLUSIONES

- Se plantea como solución un sistema Bitúnel de 7 m, con dovelas de 0.30 m de espesor. No obstante se realizará en el desarrollo de las actividades cara al aval técnico un análisis para validar o no está solución a la luz de los tipos de materiales que serán cruzados por la Línea Metro, como teniendo en cuenta la interacción entre estos túneles y el análisis de costos frente a la solución con un Mono túnel.
- Dado que no se tiene información concreta del diseño del espesor de dovela en la opción propuesta de Bitúnel, en la actividades de respaldo del aval técnico se realizará un análisis preliminar de este aspecto de diseño de tal forma que se verifique que el espesor y el acero de refuerzo previsto permitan asimilar los esfuerzos a los que será sometidos los túneles (por sobrecargas, presiones de agua, del terreno, eventos sísmicos, fuego, cargas de transferencia de fuerzas sobre el anillo a lo largo de la juntas longitudinales y transversales, peso propio , etc).
- El estudio de prefactibilidad deja claro que la implantación de un perfil vial V2 a lo largo de la calle 72, existirán afectaciones prediales con varios críticos en los cuales la sección de ancho de 27.2m es mayor que el ancho actual existente de 26.7 m entre la Av. Caracas y NQS como de 23.6 m entre la NQS y la carrera 68. La opción Bitúnel impactaría en mayor grado este sector por ser una solución más superficial que una Monotubo, y por tener estaciones cuyos anchos sobrepasan el corredor existente impactando las estructuras y/o cimentaciones de estas construcciones. Este aspecto será analizado en mayor detalle dentro de las actividades cara al aval técnico.
- El trazado plantea pasar por debajo del canal Arzobispo a una profundidad de 7 m, donde se detecta muy baja cobertura. En este sector se realizará un análisis al menos preliminar de asientos o de efectos del sistema Bitúnel o mono túnel con las afectaciones en superficie, y se definirán las medidas de pretratamientos en caso de ser necesario.
- Dado que se detecta que podría haber impacto con la opción Bitúnel (siendo más superficial y con una profundidad del orden de 1 diámetro, es decir a 7 m), al pasar por debajo de la red matriz del acueducto de Tibitoc de 78" en la Av. Boyacá, será otro de los aspectos que serán analizados en cualquiera de las soluciones (Bitúnel o Monotúnel) para efectos de tener este aspecto resuelto cara al aval técnico.
- En la zona de paso de la Línea de Metro por debajo del canal Salitre, también se detecta muy baja cobertura en los esquemas previstos de prefactibilidad. donde se deduce de los planos que la línea pasa apenas 4 m de cobertura. En esta zona el estudio de factibilidad buscará pasar a mayor profundidad para impactar en menor grado la estructura del canal, así como definir si será necesario realizar algún pretratamiento para reducir asientos.
- En la zona del brazo del Humedal Juan Amarillo, el estudio de prefactibilidad asume como cobertura 12.62 m, es decir aproximadamente a 1.8 veces el diámetro del Bitúnel. En esta zona se requerirá profundizar aún más la línea, revisando el efecto de asientos y determinando si será necesario aplicar alguna otra medida de mitigación p.e tratamientos del terreno .
- El trazado previsto en la prefactibilidad en el tramo 7, plantea una sección soterrada con sistema Cut & Cover en la zona de la ALO, lo cual interfiere con el trazado del canal existente Cafam en esta parte MOVIUS plantea opciones de tal forma que permitan reducir costos, tiempos e interferencias con las líneas de acueducto y alcantarillado.
- En la zona de la cola de maniobras el estudio de prefactibilidad propone un túnel entre pantallas (Cut & Cover) que tendrá profundidades de 23 a 38 m y una larga extensión en longitud, en la zona de la Calle 72, donde existen grandes edificaciones y donde está obra profunda podría impactar el sector, tanto geotécnicamente como en la parte predial, y afectación del tráfico y social. Esta parte será revisada a la luz de la litología que sea confirmada con el plan de exploración geotécnica y analizando la posibilidad de realizar modificaciones al sistema EPB o aplicando sistema Slurry PB o una máquina mixta.
- La recomendación de ubicar los túneles con sistema TBM (tal como es mencionado en el estudio de prefactibilidad), plantea un recubrimiento mínimo de una vez el diámetro del túnel y como máximo de dos veces el diámetro. Este aspecto será revisado para encontrar la justificación técnica cara al aval técnico.
- Se indica que la tipología de trinchera cubierta requerirá de soportes del terreno y de evacuación de aguas de la zona de obras. Se precisa que el sistema que debe ser aplicado es el Cut & Cover (metodo invertido), con miras a; reducir la afectación en superficie de interrupción de tráfico y social, por un lado, y debe evitarse la salida de agua durante la construcción, para evitar asentamientos y daños a las edificaciones y servicios existentes en inmediaciones a estas obras.
- Se indica que es factible la construcción del túnel en línea utilizando el tipo de tuneladora presurizada de equilibrio de presión de tierras( EPB), aspecto que se considera acertado pero será necesario disponer de un mayor detalle en los diseños o requerimientos mínimos del tipo de la máquina. Dado que no hay mayor detalle del sistema EPB se presentarán para el aval técnico esquemas de las soluciones geotécnicas para el paso en los puntos críticos; debajo de canales o cuerpos de agua, zonas con presencia de turbas y gases, pasó en la zona del deprimido, presencia de materiales mixtos.
- La información analizada presenta someramente que se requerirán pozos de recepción y salida. Estos aspectos serán analizados en mayor detalle para dar dimensionamientos, profundidades, e información que permita validar este aspecto dentro de la factibilidad.

- De las experiencias existentes en materiales similares a los que se encontrarán en la Línea 2 del Metro de Bogotá, con arcilla de alta plasticidad, baja resistencia y alta humedad como la posibilidad de encontrar hacia la zona de cola de maniobras materiales mixtos de gravas, arenas, limos y arcillas, se consultó una experiencia similar presentada para la Línea 1 del Metro de México, la cual muestra que es posible construir el túnel con el sistema de máquinas EPB, realizando algunos ajustes a la máquina y aplicando algunos acondicionantes en el frente de excavación (espumas o polímeros), tal como se describe en el caso dentro del benchmark de este documento. También es importante resaltar que en el caso de la Línea 12 del Metro de México cruzaron bajo un río y otras estructuras enterradas, con baja cobertura, sin que se produjeran mayores problemas en superficie. Para el control de la excavación en estos sitios críticos fue fundamental la instrumentación geotécnica en forma continua durante el proceso de construcción llevada a cabo tanto externamente en superficie como internamente dentro del túnel.
- Se realizó una revisión de los conceptos emitidos en el análisis multicriterio aplicado para definir como solución viable el sistema Bitúnel que luego fue complementado por la EMB (Empresa Metro de Bogotá) ratificando la opción Bitúnel. Sin embargo, dado que varios de los aspectos analizados en esta parte tienen un carácter subjetivo, MOVIUS ha puesto varios de los subcriterios en términos de cantidades, costos y tiempos, para reducir o eliminar la subjetividad, con lo cual se logra revertir la recomendación hacia una solución Mono túnel. Además según la investigación realizada por MOVIUS respecto a soluciones Mono túnel o Bitúnel, muestra que en la región existe una mayor tendencia a implantar una solución Mono túnel básicamente por tema de costos.

#### 2.2.24.6 REFERENCIAS

Benamar, I., 2012. Construcción del Túnel de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México. 2° Simposio Internacional de Túneles y Lumbreras en Suelos y Roca - AMITOS - SMIG.

Bono, R., Ortu, M., Valdemarin, F., 2008. Surface settlement minimization in soft soil when excavating with an earth pressure balance shield. Jornada Técnica: Túneles con EPB Simulación y Control de la Tuneladora. Barcelona, 21 de Mayo de 2008

Consorcio Canoas, 2010. Contrato No.1-01-25500-1115-2009. Diseño geométrico dovelas I-TU-PT-001

Consorcio L1.2015. Metro 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). Producto 04. Proyecto de Túneles y Obras Subterráneas . 202006-DFPR04-ANX14-MEM-00-VF. 0- Memoria General

Consorcio L1.2015. Metro 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). Producto 04. Proyecto de Túneles y Obras Subterráneas . 202006-DFPR04-ANX14-MEM-02-VF. 2- Geología y Geotecnia.

Consorcio L1.2015. Metro 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). Producto 04. Proyecto de Túneles y Obras Subterráneas . 202006-DFPR04-ANX14-MEM-03-VF. 3- Procedimientos Constructivos.

Egis- Steer .2021. Producto 4 Estudios y Diseños de Pre-factibilidad. Entregable 5.1 Revisión Geotécnica.

Egist- Steer .2021. Producto 4- Estudios y diseños de Pre-factibilidad. Entregable 6- Prediseño geométrico del trazado. Definición estructura Metro ferroviarias.

Guerrero, B., Amalia, J, Rodriguez, A. 2009. L9 del Metro de Barcelona . Aspectos tecnológicos e industriales.

IDU- INGETEC. 2017. Actualización, Complementación, Ajustes de los diseños Existentes, y/o Elaboración de los estudios y diseños, para la adecuación del sistema de transmlenio de la Carrera 7 desde la Calle 32 hasta la Calle 200, Ramal de la Calle 200 entre Carrera 7 y Avenida Caracas , patio portal, conexiones operaciones Calle 26, CALLE 100, calle 170 y demás obras complementarias en Bogotá D.C.Contrato No. 1073 de 2016. Documento No. TK7-ED-CP8.1 - R4. Estudios y Diseños Definitivos de Geotecnia.

Metro de Bogotá. 2021. República de Colombia. Realizar la Estructuración Integral del proyecto Línea 2 del metro de Bogotá,incluyendo los componentes legal, de riesgos,técnico y financiero. Estudio multicriterio para evaluación de alternativas Monotubo - Bitubo para la construcción del tramo subterráneo de la segunda Línea del metro de Bogotá (SLMB). Proyecto Túnel.

Metro de Bogotá. 2021. República de Colombia. Realizar la Estructuración Integral del proyecto Línea 2 del metro de Bogotá,incluyendo los componentes legal, de riesgos,técnico y financiero. Alternativas para el Tramo: Paso Av. Caracas, Pozo de lanzamiento/ Recepción, Estación 1 y Cola de Maniobras. Proyecto Túnel.

FND- MOVIUS.2022. Realizar la estructuración integral del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá, incluyendo los componentes legal, de riesgos, técnico y financiero. Análisis tipología de túnel monotubo vs. bitubo y tipología en tramo ALO. Documento No. L2MB-0000-000-MOV-DP-GEO-EV-0002\_RA

QuitoInforma.gob.ec. 2018 .A punto de concluir la Construcción del Metro de Quito.

Ruzicka, P.,Makasek, P., Polak, B. Tyrlik,M. 2012. Baku Metro: Design and Construction of the Violet Line.

Saaty, T. 1980. The Analytic Hierarchy Process. Ed. McGrawhill