

## TABLA DE CONTENIDO

<b>2.2.10 GEOTECNIA Y PAVIMENTOS</b>	5
<b>2.2.10.1 NORMATIVIDAD APLICABLE</b>	5
<b>2.2.10.2 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA L2MB</b>	6
<b>2.2.10.3 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE REFERENCIA</b>	64
<b>2.2.10.3.1 Variabilidad de parámetros</b>	64
<b>2.2.10.4 ASPECTOS RELEVANTES DE LOS ESTUDIOS Y DISEÑOS DE LA PLMB</b>	74
<b>2.2.10.4.1 Línea 1 elevada (en construcción)</b>	74
<b>2.2.10.4.1.1 Deprimido en la intersección entre la Av Caracas y la Calle 72</b>	74
<b>2.2.10.4.1.2 Cimentaciones profundas</b>	82
<b>2.2.10.4.2 Línea 1 subterránea (2014)</b>	87
<b>2.2.10.5 CONCLUSIONES</b>	95

## LISTA DE TABLAS

[Tabla 1.](#) Factores de seguridad mínimos para la evaluación de estabilidad de taludes. Fuente NSR-10.

[Tabla 2.](#) Desplazamientos máximos admisibles. Fuente: NSR-10.

[Tabla 3.](#) Perfil estratigráfico y parámetros geotécnicos de diseño para el paso deprimido de la Av. Caracas en el proyecto L1MB en construcción. Fuente: Metro Línea 1, 2021.

[Tabla 4.](#) Dimensionamiento de las pantallas para el paso deprimido de la Calle 72 bajo la Av. Caracas.

[Tabla 5.](#) Cantidades para la instrumentación de secciones a lo largo del corredor del proyecto L1MB 2014.

[Tabla 6.](#) Umbrales de movimientos admisibles establecidos para el control de los efectos de las obras del proyecto L1MB en el entorno de los segmentos de túnel entre pantallas.

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

[Fotografía 1.](#) K0+000.  
[Fotografía 2.](#) K0+285.  
[Fotografía 3.](#) K0+285.  
[Fotografía 4.](#) K0+530.  
[Fotografía 5.](#) K0+530.  
[Fotografía 6.](#) K0+770.  
[Fotografía 7.](#) K0+800.  
[Fotografía 8.](#) K0+890.  
[Fotografía 9.](#) K1+150.  
[Fotografía 10.](#) K1+290.  
[Fotografía 11.](#) K1+460.  
[Fotografía 12.](#) K1+580.  
[Fotografía 13.](#) K2+500.  
[Fotografía 14.](#) K+2+560.  
[Fotografía 15.](#) K2+600.  
[Fotografía 16.](#) K2+975.  
[Fotografía 17.](#) K3+640.  
[Fotografía 18.](#) K4+250.  
[Fotografía 19.](#) K4+310.  
[Fotografía 20.](#) K4+370.  
[Fotografía 21.](#) K4+420.  
[Fotografía 22.](#) K4+580.  
[Fotografía 23.](#) K5+710.  
[Fotografía 24.](#) K5+810.  
[Fotografía 25.](#) K5+840.  
[Fotografía 26.](#) K5+800.  
[Fotografía 27.](#) K6+910.  
[Fotografía 28.](#) K6+990.  
[Fotografía 29.](#) K8+210.  
[Fotografía 30.](#) KK8+260.

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

[Fotografía 31](#). K8+370.  
[Fotografía 32](#). K8+755.  
[Fotografía 33](#). K9+255.  
[Fotografía 34](#). K9+255.  
[Fotografía 35](#). K9+255.  
[Fotografía 36](#). K9+470.  
[Fotografía 37](#). K10+290.  
[Fotografía 38](#). K10+290.  
[Fotografía 39](#). K11+620.  
[Fotografía 40](#). K12+065.  
[Fotografía 41](#). K12+495.  
[Fotografía 42](#). K12+495.  
[Fotografía 43](#). K14+130.  
[Fotografía 44](#). K14+130.  
[Fotografía 45](#). K14+750.  
[Fotografía 46](#). K15+000.  
[Fotografía 47](#). K15+420.  
[Fotografía 48](#). K15+750.

## LISTA DE FIGURAS

[Figura 1](#). Localización de las estaciones y trazado de la Línea 2 del Metro de Bogotá.

[Figura 2](#). Tipologías constructivas para estaciones y segmentos de línea.

[Figura 3](#). Variabilidad de parámetros en el corredor.

[Figura 4](#). Variabilidad de parámetros en el corredor.

[Figura 5](#). Variabilidad de parámetros en el corredor.

[Figura 6](#). Variabilidad de parámetros en el corredor.

[Figura 7](#). Relación entre la humedad natural, los límites de Atterberg y el índice de compresibilidad de los materiales en el corredor de LZMB.

[Figura 8](#). Variación de la humedad natural en las zonas homogéneas.

[Figura 9](#). Variación de la humedad natural en las zonas homogéneas, separadas según la zona de respuesta sísmica establecida en la MZSB.

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

[Figura 10.](#) Planta geológica y alineamiento de la PLMB

[Figura 11.](#) Localización pruebas de carga.

[Figura 12.](#) Curvas de factor de adhesión - día

[Figura 13.](#) Localización y trazado proyecto PLMB 2014 - Metro subterráneo.

[Figura 14.](#) Secciones típicas de estaciones en el proyecto PLMB 2014. A la izquierda la sección estaciones T1p y a la derecha estaciones T2p.

## LISTA DE ANEXOS

[Anexo 1.](#) Trazado de la Línea 2 y localización de las exploraciones sobre el mapa de Zonas de Respuesta Sísmica del estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.

[Anexo 2.](#) Trazado de la Línea 2 y localización de las exploraciones sobre el mapa de Zonas Geotécnicas del estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.

[Anexo 3.](#) Trazado de la Línea 2 y localización de las exploraciones sobre el mapa de Geología Urbana publicado por IDIGER.

[Anexo 4.](#) Trazado de la Línea 2 y localización de las exploraciones sobre el mapa de Geomorfología Urbana publicado por IDIGER.

[Anexo 5.](#) Trazado de la Línea 2 y localización de las exploraciones sobre el mapa de Zonificación de Amenaza por Inundación vigente en la ciudad de Bogotá.

[Anexo 6.](#) Trazado de la Línea 2 y localización de las exploraciones sobre el mapa de Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa vigente en la ciudad de Bogotá.

[Anexo 7.](#) Trazado de la Línea 2 y localización de la Red Matriz del Acueducto de Bogotá.

[Anexo 8.](#) Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA ) de la ciudad en el año 2017.

[Anexo 9.](#) Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA ) de la ciudad en el año 2014.

[Anexo 10.](#) Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA ) de la ciudad en el año 2010.

[Anexo 11.](#) Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA ) de la ciudad en el año 2007.

[Anexo 12.](#) Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA ) de la ciudad en el año 2004.

[Anexo 13.](#) Trazado de la Línea 2 sobre una aerofotografía de la ciudad de Bogotá en el año 1967. Mala calidad.

[Anexo 14.](#) Trazado de la Línea 2 sobre el mapa geológico generado para la Microzonificación Sísmica (1997) de la ciudad de Bogotá.

[Anexo 15.](#) Trazado de la Línea 2 sobre el mapa hidrogeológico generado para la Microzonificación Sísmica (1997) de la ciudad de Bogotá.

[Anexo 16.](#) Trazado de la Línea 2 sobre el Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. (INGEOMINAS, 2002)

[Anexo 17.](#) Trazado de la Línea 2 sobre el mapa de velocidades de subsidencia de la ciudad entre 2011 y 2017. (Mora-Paez, Diaz-Mila & Cardona, 2020)

[Anexo 18.](#) Plan de exploraciones. Revisión F.

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

## 2.2.10 GEOTECNIA Y PAVIMENTOS

Disciplina:	Geotecnia y pavimentos
Entregable de referencia:	Entregable 6 / ET10 - Geotecnia y pavimentos

### 2.2.10.1 NORMATIVIDAD APLICABLE

#### 2.2.10.1.1 Normatividad nacional



- Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes Ministerio de Transporte. CCP-2014. Aplicado en estructuras viales como: puentes vehiculares y peatonales, box culvert y en estructuras de contención según lo establecido en la Resolución 108 de enero 26 de 2015.
- Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Aplicado a edificaciones verticales según lo establecido en la Ley 400 de 1997 y en el Decreto 926 de marzo 19 de 2010.
- Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. INVIAS, 2012. Sección 100-Suelos. Para la ejecución de las actividades de exploración y caracterización del suelo.
- Zonificación de la Respuesta Sísmica de Bogotá para el Diseño Sismorresistente de Edificaciones. Según lo establecido en el Decreto 523 de 2010 de la Alcaldía Mayor de Bogotá.

#### 2.2.10.2 Normatividad internacional

- Versiones vigentes de las normas emitidas por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM). Para la ejecución de ensayos de laboratorio no cubiertos por el Manual de Ensayos de Materiales para Carreteras de INVIAS.

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

## 2.2.10.2 REVISIÓN DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA L2MB

<b>Entregables de referencia:</b>	Producto 4   Entregable 5.1 Revisión Geotécnica.
<b>Actividades desarrolladas en el marco del estudio de prefactibilidad:</b>	<p>En esta sección se analiza y complementa (con información secundaria adicional) lo presentado en el Entregable 5.1.</p> <p>Vale la pena mencionar de entrada otros capítulos de esta Debida Diligencia Técnica tratan también de temas relacionados con geotecnia, esos son:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● <a href="#">ET19</a>: en ese capítulo se hace la revisión de las referencias e información geotécnica disponibles para lo relacionado con el Patio Taller: En ese documento se da particular importancia a las obras previstas para la conformación de la plataforma en el lote.</li><li>● <a href="#">ET24</a>: en el capítulo dedicado a la Especificación Técnica 24 se presenta la revisión de todo lo relacionado con las obras subterráneas para la Línea 2 del Metro de Bogotá.</li><li>● <a href="#">ET25</a>: en este capítulo se revisa todo lo relacionado con obras subterráneas para estaciones.</li></ul> <p>El análisis de información presentado en este documento y las referencias consultadas están relacionadas, principalmente, con dos componentes:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● La caracterización geotécnica del corredor.</li><li>● El análisis de referencias en lo relacionado con cimentaciones profundas, como las previstas en el tramo elevado del trazado.</li></ul> <p>Antes de entrar en el componente técnico, se presenta una breve contextualización con la localización y la tipología de los tramos y estaciones mencionados. La figura 1.2 del entregable, que se presenta a continuación, muestra la localización (puntos de color magenta) de las 11 estaciones de la Línea 2 y permite identificar el tramo semienterrado (de color azul claro) y el tramo elevado (de color rojo).</p>



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

ID	ESTACION	m Este	m Norte
1	Av. Cl 72	1002069.9	1006747.1
2	Av. NQS	1000472.3	1007940.9
3	Av. 68	999025.6	1008969.7
4	Av. Boyacá	997982.5	1010079.4
5	Av. Ciudad de Cali	997106.4	1010811.6
6	Av. Cl 80	997448.9	1011772.4
7	Carrera 91	998097.3	1012546.3
8	Humedal	998161.1	1013611.3
9	ALO Sur	997031.2	1015292.2
10	ALO norte	996830.2	1016872.0
11	Fontanar	995807.1	1017546.6

Figura 1. Localización de las estaciones y trazado de la Línea 2 del Metro de Bogotá. Coordenadas en el sistema Magna Sirgas.

Si bien la figura permite ubicar las estaciones en el contexto del proyecto hay dos aspectos que pueden ser mejorados:

- No hay coordenadas que permitan ubicarlas rápidamente en un Sistema de Información Geográfica.
- No hay claridad con respecto al significado de la segunda columna de la tipología de cada estación. Es decir, no queda clara la diferencia entre estaciones subterráneas de tipología central y estaciones subterráneas de tipología lateral.

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

Para abordar el primero de los puntos se generó la tabla que es presentada junto a la figura; y para el segundo se hace uso de lo presentado en el documento "Presentación resultados prefactibilidad" de mayo de 2021, en el que se ilustra la tipología de las estaciones y tramos:

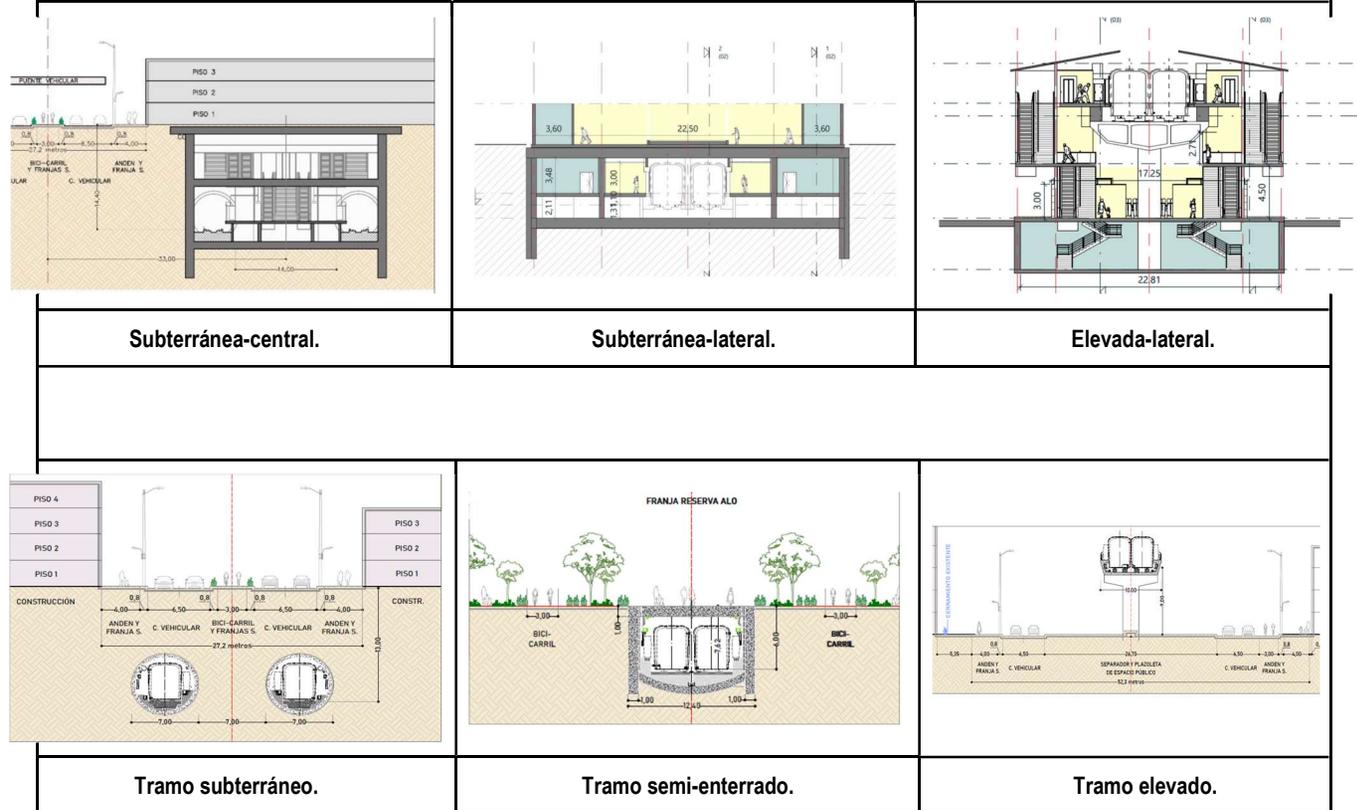


Figura 2. Tipologías constructivas para estaciones y segmentos de línea.

El contenido del entregable 5.1 se puede dividir en cuatro componentes: (1) descripción del contexto geológico, geomorfológico e hidrogeológico a nivel regional y local, (2) descripción geotécnica del corredor a partir de información secundaria, (3) identificación y caracterización de amenazas de origen geotécnico y (4) conclusiones y recomendaciones. A continuación se presenta la revisión y complementación de cada uno.

- **1. Descripción del contexto geológico, geomorfológico e hidrogeológico:** se parte de un análisis del contexto geológico a nivel regional, en el que se describe la formación y levantamiento de la cuenca sedimentaria de la Sabana de Bogotá, dando especial importancia a geología estructural, de ese componente vale la pena mencionar que se encontró que el lineamiento del proyecto se cruza con la Falla Usaquén-Juan Amarillo de la que se reporta, citando a (INGEOMINAS, 1996): “no se encontraron indicios de actividad reciente, por lo que fue catalogada como de actividad incierta” (2.8); más adelante se dice con respecto a esta falla:
- “...no se han asociado eventos sísmicos y no fue considerada en la microzonificación sísmica de la Sabana de Bogotá (sic) como fuente sísmica” (2.8).
  - “Se trata de un rango 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 asociación a fuentes termales (Las Pléyades y Sie Chetupcua), en la zona del humedal Juan Amarillo y el Club Los Lagartos (Royo y Gómez, 1946)” (2.50).



En cuanto a la estratigrafía de la Sabana se hace una descripción muy detallada de cada uno de los depósitos identificados que se puede resumir así: “...las unidades geológicas que conforman el relleno de la Sabana de Bogotá, de techo a base, son: sedimentos de ambientes denudativo, aluvial, lacustre y fluvial, con edades que van desde el periodo Neógeno hasta el Cuaternario” (2.9).

La Geología Local que atraviesa el corredor del proyecto es descrita así: “La Formación Sabana ocupa la mayor parte del recorrido, cerca del 98%, representada en las arcillas, arcillas limosas con trazas orgánicas e interlaminações de limos y turbas, de génesis fluviolacustre y aluvial y tiene, a lo largo del trazado, espesores mayores a 200 m...”, esta descripción se basa en lo encontrado en dos fuentes de información:

- Una figura que tiene como referencia el Decreto 523 de 2010 de la Alcaldía de Bogotá (que es por el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de la ciudad). Es importante notar que esa figura no hace parte de lo presentado en los documentos del estudio de Microzonificación, y corresponde con el mapa de Geología Urbana publicado por IDIGER ([Anexo 3](#)).
- Se presenta también una imagen, que sí es parte del documento técnico de la Microzonificación Sísmica, que muestra el trazado del proyecto sobre el Mapa Geológico de Bogotá, en escala 1:25000, generado por INGEOMINAS en 1995. En esta representación, casi la totalidad del trazado está en la Unidad Terraza Alta descrita así en el informe del estudio de Microzonificación: “Llamada también Formación Sabana por Hubach (1957) y Helmens (1990) este depósito está constituido por arcillas plásticas con lentes de arena suelta e intercalaciones de cenizas volcánicas, en algunos sectores se presentan varios

niveles de turbas hasta de 1 m de espesor. Esta unidad constituye el relleno más importante de la Sabana, siendo su origen lacustre”. La parte inicial del trazado atraviesa la unidad Complejo de Conos (...En general esta unidad se componen de bancos de bloques, guijarros y guijos dentro de una matriz areno arcillosa en las zonas apicales y hacia las partes distales se encuentran materiales predominantemente arenosos y limo arcillosos.), y en la zona occidental de la ciudad cruza también la unidad Llanura de Inundación (*Llamada también Formación Chía por Helmens (1990) en esta unidad están los depósitos más jóvenes de los ríos Bogotá, Tunjuelo y algunos de sus afluentes. Estos depósitos constan de arcillas y limos, con un espesor promedio de 5m y son materiales de un ambiente fluvial y localmente lacustre*).

La descripción de la geología se valida con la información encontrada en las siguientes fuentes adicionales:



- El Mapa geológico de la ciudad de Bogotá generado por INGEOMINAS para el proyecto de Microzonificación Sísmica de 1997 ([Anexo 14](#)). En este mapa casi la totalidad del trazado atraviesa la unidad Qta (Depósitos fluvio-lacustres–Terraza alta): compuesta por “...arcillas con intercalaciones importantes de bancos de arena y grava, ocasionalmente delgadas capas de ceniza volcánica y turbas”. En el cruce del trazado con el canal Salitre (en el sector del Humedal Juan Amarillo) se atraviesa un sector con las unidades Qtb y Qlla (sobre esta unidad están también los últimos 600 m del trazado y el lote destinado al Patio Taller). La descripción de estas unidades es la siguiente:
  - Qtb (Depósitos fluvio lacustres–Terraza baja): “Depósitos de los ríos Bogotá, Tunjuelito y afluentes, con geoformas planas a ligeramente onduladas, de composición limo-arcillosa”.
  - Qlla (Llanura de inundación): “Depósitos aluviales más jóvenes de los ríos Bogotá, Tunjuelito y afluentes; constituidos por arcilla y limos”.



- El mapa de Geología Urbana (IDIGER, 2016)<sup>1</sup> que se presenta en el [Anexo 3](#). En este mapa la Línea 2 atraviesa dos unidades descritas en el Entregable 5.1: Qsa1: Formación Sabana en la mayor parte del trazado y Qch1: Formación Chía en el cruce con el Humedal Juan Amarillo y en el lote del Patio Taller.

Para cerrar la descripción del contexto geológico se menciona que se espera una reducción de los espesores de depósito en la parte del trazado que se acerca a los Cerros de Suba, en esa zona se espera que el depósito esté intercalado con depósitos coluviales o aluviocoluviales compuestos por arenas limosas y arcillas arenosas.

<sup>1</sup> Esta capa geográfica de uso libre tiene una particularidad y es que no cubre la totalidad del área urbana de la ciudad. Se puede consultar en el siguiente enlace: <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/geologia-para-bogota>

La descripción geomorfológica parte también de un análisis regional de la formación y levantamiento de la Sabana de Bogotá. Presentan en la Figura 2.5 un Mapa Geomorfológico de la Sabana (INGEOMINAS, 2005), en el que es importante notar que el trazado de la Línea 2 del Metro está mal implantado, excediendo ampliamente la zona de influencia real del proyecto. La descripción presentada de las unidades que realmente atraviesa el proyecto no coincide con lo que muestra la Figura 2.5, a continuación se presenta un ajuste a esa descripción (en el que se hizo uso del Mapa de Geomorfología Urbana publicado por IDIGER–[Anexo 4](#)):

- Planicies y deltas lacustrinos (Fpla): sobre esta geoforma se ubica la mayor parte del trazado, corresponde a una planicie extensa, aterrizada y de morfología ondulada suavemente inclinada hacia el oeste y limitada por el río Bogotá. Está constituida principalmente por arcillas grises con locales intercalaciones de arenas finas y por ocasionales y delgados niveles de gravas y turbas. Según el Mapa de Geomorfología Urbana de Bogotá la estructura natural de esta geoforma ha sido modificada por el hombre y queda clasificada como Área Urbanizada (Aur).
- Planos de inundación (Fpi): la nomenclatura Fpi corresponde a Planos de inundación, no a terrazas fluviales por erosión, como reporta el entregable 5.1. Esta geoforma se caracteriza por ser plana a ondulada, y bordea los cauces y humedales que atraviesa el trazado de la Línea. Esta descripción se ajusta a lo que en el entregable se describe bajo el nombre Planos anegadizos (Fpa) que son descritos como “*artesas de bajo relieve, planas y de formas irregulares, mal drenadas que se localizan en las planicies lagunares o de inundación del río y cuyo origen se relaciona fundamentalmente a encharcamientos pluviales en zonas planas*” (2.61). Esta unidad se encuentra también en la zona de los humedales y cerca al río Bogotá, cubriendo todo el lote en el que se ha proyectado el Patio Taller.

La hidrogeología del corredor del proyecto se describe siguiendo un enfoque similar al usado en los componentes anteriores, es decir, se hace una descripción regional –que no aporta información puntual de la zona del proyecto– que después se complementa con una descripción detallada de las unidades encontradas en la zona urbana de la ciudad.

En términos generales, lo relevante –esto se consulta en el Modelo Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2002–[Anexo 16](#)), en el informe Modelo Hidrogeológico Conceptual del Acuífero Subsuperficial o Somero en el Perímetro Urbano del Distrito Capital<sup>2</sup> y en el Mapa Hidrogeológico de Santafé de Bogotá (generado por INGEOMINAS para la Microzonificación Sísmica de 1997, presentado en el [Anexo 15](#))– es:

- A nivel regional, según el Modelo Hidrogeológico de la Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 2002–[Anexo 16](#)) se identifican tres unidades hidroestratigráficas principales:
  - Complejo Acuífero de los Depósitos No Consolidados (NgQ). El trazado de la Línea 2 está ubicado en su totalidad en esta unidad, que es descrita así: “*Este complejo acuífero abarca la topografía más plana de la cuenca de la Sabana. Está constituida por sedimentos lacustres, aluviales, coluviales y fluvio-glaciares que se caracterizan por tener cambios fuertes en la composición litológica y facial en cortas distancias, lo que no*

<sup>2</sup> [https://ambientebogota.gov.co/documents/10184/2273625/Informe+Metodologico+MHC+del+Acuifero+de+Bogota\\_1.pdf/5bf7fa77-3091-4d56-81a4-0feae4ac18e2](https://ambientebogota.gov.co/documents/10184/2273625/Informe+Metodologico+MHC+del+Acuifero+de+Bogota_1.pdf/5bf7fa77-3091-4d56-81a4-0feae4ac18e2)

permite diferenciar unos horizontes continuos y uniformes, agrupando todos estos depósitos en un solo complejo acuífero bastante (sic) heterogéneo. El espesor de estos depósitos en la parte central y más profunda supera los 500 m". Los parámetros hidráulicos característicos de la unidad son:

- Transmisividad entre 3 y 900 m<sup>2</sup>/día.
  - La capacidad específica varía entre 0,1 y 3 l/s/m
  - Coeficiente de almacenamiento <0,1 a 3.
  - Conductividad hidráulica entre 0,1 y 3 m/día.
  - Las unidades geológicas asociadas a la unidad son: Qal (depósitos aluviales), Qc (depósitos coluviales), Qfig (depósitos fluvio-glaciares), Qaa (depósitos de abanico aluvial), Qta (depósitos de terraza alta) y NgQt (Formación Tilatá).
- Complejo Acuitardo del Paleógeno (Pg). Que se describe así: *"Infrayaciendo el complejo acuífero de depósitos inconsolidados, se encuentra una secuencia de rocas predominantes arcillosas que constituyen el Complejo Acuitardo del Paleógeno, dentro del cual se distinguen unidades acuíferas y unidades poco permeables (acuitardos)"*.
  - Complejo Acuífero Guadalupe (Kg), descrita así: *"El complejo acuífero Guadalupe esta representado por rocas sedimentarias marinas del Cretácico Superior, con un espesor máximo reportado de 950 m. Este complejo está constituido principalmente por areniscas cuarzosas que alternan con liditas, limolitas y arcillositas..."*
- Por la escala de este modelo (1:100.000) es difícil emitir conclusiones con respecto a la influencia de la hidrogeología en el corredor de la Línea 2, sin embargo, de las líneas equipotenciales y de flujo se puede decir que el agua subterránea se mueve hacia el suroriente de la ciudad.
  - El Mapa Hidrogeológico de Santafé de Bogotá (INGEOMINAS 1997–[Anexo 15](#)) fue generado a una escala un poco mayor (1:50.000) y da un poco más de detalle, sin embargo las conclusiones son similares:
    - La mayor parte del trazado atraviesa unidades descritas como *"sedimentos porosos: complejo acuífero de extensión regional conformados por las unidades pliocuaternarias Qta, Qsu, Tqt+Qsu y Qcc. Es un acuífero de tipo libre a confinado, está conformado por una alternancia de niveles de arcillas, limos y niveles de arenas finas, medias, gruesas hasta gravas"*.
    - El cruce del trazado con el Humedal Juan Amarillo y el lote para el Patio Taller están en unidades identificadas como *"Complejos impermeables (Qla y Qtb): unidad hidrogeológica de distribución local formada por sedimentos arcillosos de depósitos recientes de poco espesor"*.
    - Este mapa muestra también isoyetas para tres condiciones típicas:
      - Año seco: en esta condición se tiene una precipitación en la zona del trazado entre 800 y 500 mm anuales. Siendo mayores las precipitaciones en la parte oriental de la ciudad.
      - Año medio: siguiendo una distribución espacial similar que la observada en años secos la variación anual acumulada varía entre 1200 y 900 mm.
      - Año húmedo: en años clasificados de esta manera la precipitación acumulada varía entre 1300 mm/año, al oriente de la ciudad (K1+000) y 900 mm/año al occidente (K13+500).

- Lo encontrado en estas fuentes de información confirma la posibilidad de encontrar presiones artesianas en el trazado planteado para la Línea 2, pues:
  - Se espera que haya flujo confinado en las capas de arenas y gravas del depósito.
  - Las líneas de flujo y de corriente del Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana muestran gradientes que conducen el flujo hacia el sureste de la zona urbana de la ciudad.
  - Las mayores precipitaciones en la ciudad se presentan en la zona oriental, en la que están también las zonas de recarga del acuífero.
- En conclusión, la previsión de estas presiones artesianas justifica la instalación de piezómetros como se propone el Plan de Exploraciones del proyecto ([Anexo 18](#)).
- **Descripción del contexto geotécnico a partir de información de referencia:** antes de hablar del diagnóstico emitido en el entregable 5.1, es necesario mencionar algunos puntos relacionados con la revisión de fuentes secundarias de información:
  - De esas fuentes, la principal es el Sistema de Información Geotécnica del Acueducto de Bogotá (SISGEO). En términos generales, la información que se puede extraer de esta fuente se limita a la caracterización física de los materiales: humedad y color, en algunos casos se reporta también una resistencia no drenada, pero no hay anexos que permitan asegurar la calidad de la información (es decir, no es posible verificar el buen uso de unidades o el correcto procesamiento de los datos).
  - De SISGEO se extrae la información de los sondeos identificados con las nomenclaturas: AC72-02, AC80-03 y ACCA-07.
  - La información extraída de las otras fuentes de información incluye una caracterización más detallada, sin embargo, es necesario recopilar todos los archivos de soporte de esas perforaciones, pues no fue encontrada en los anexos del Entregable 5.1.

El diagnóstico geotécnico del corredor parte de su división en tres zonas de características relativamente homogéneas; según el informe, esa clasificación se basa completamente en las profundidades y características encontradas en el análisis de la información de referencia. Las zonas son:

- **Zona I: K0+000 a K0+450** (tramo de la cola de maniobras):
  - Caracterización física: la primera capa en esta zona del corredor, de 2,0 m de espesor, está compuesta por materia orgánica con suelos limo-arcillosos o por rellenos viales. La segunda, entre 2,0 y 25,0 m de profundidad, está compuesta por depósitos coluviales en matriz arena arcillosa, esta matriz, según la información revisada tiene una humedad relativamente baja, de 22% en promedio y un índice de plasticidad promedio del orden de 17%. La descripción se puede complementar usando el Mapa de Zonas Geotécnicas de la Microzonificación Sísmica de Bogotá ([Anexo 2](#)), en ese mapa el tramo queda dividido en dos unidades: entre K0+000 y K0+100 la unidad es Piedemonte, compuesta principalmente por gravas arcillo arenosas compactas y entre K0+100 y K0+450 la unidad es Aluvial en la que predominan arenas arcillosas de compacidad variable.
  - Resistencia: la resistencia del material encontrado en esta zona se describe en términos de ángulos de resistencia con 3 estratos representativos definidos a partir de una perforación de 25 m de profundidad

ejecutada por INGETEC en el marco del proyecto diseño de Transmilenio por la carrera 7, el primero entre 0 y 4,5 m de profundidad con  $\varphi'=28^\circ$ , el segundo entre 4,50 y 6,0 m, con  $\varphi'=34^\circ$  y el último entre 6 y 25 m con  $\varphi'=24^\circ$ .

- **Compresibilidad:** de la compresibilidad de los materiales hay solamente un comentario general discutiendo los valores de velocidad de ondas cortantes, diciendo que en todo el trazado es, predominantemente, menor a 100 m/s. Esa afirmación no está soportada por ninguna fuente, de hecho, según la Zonificación de Respuesta Sísmica de la MZSB ([Anexo 1](#)) las velocidades Vs50 para esta zona (que queda clasificada como Piedemonte B) están entre 300 y 750 m/s, de este rango se puede concluir que la rigidez del material en esta zona es relativamente alta.

La Relación de Sobreconsolidación, en el depósito lacustre de la ciudad, es superior a 4 en la parte más superficial del perfil (los primeros 5 a 8 m), tendiendo a valores del orden de 1,1 y 1,3 a mayor profundidad.

- **Niveles freáticos:** no hay información específica para esta zona homogénea. A manera de comentario general reportan que en la información secundaria las profundidades típicas están entre 2 y 4 m.
- **Comentarios:** se plantea en el entregable una discusión en torno a la excavabilidad del material en la que se considera que dadas las características del suelo se puede considerar una solución “cut and cover”. Ahora, la descripción de las zonas geotécnicas de la Microzonificación Sísmica ([Anexo 2](#)) en la descripción del comportamiento del material de las dos unidades que atraviesa este tramo dice para Piedemonte: “*Suelos de alta capacidad portante (sic) pero que pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas*” y para Aluvial: “*Suelos de mediana a alta capacidad portante (sic) poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto*”.

En temas que no son considerados directamente en el entregable: los primeros metros de esta zona están cubiertos por la zonificación de amenaza por movimientos en masa de IDIGER ([Anexo 6](#)): entre K0+000 y K0+090 (esta abscisa está aproximadamente en el cruce con la Carrera 7) el trazado está en zona de amenaza media, desde la abscisa K0+090 hasta la K0+550 el trazado está en zona de amenaza baja.

- **Identificación y caracterización de amenazas de origen geotécnico:** por los materiales que constituyen este tramo –granulares confinados– es posible que durante la construcción sea necesario implementar soluciones que permitan manejar presiones artesianas. Como se mencionó antes, la excavación a cielo abierto en estos materiales puede presentar problemas de estabilidad, especialmente si el depósito es clastosoportado.
- **Zona II: K0+450 a K7+900** (corredor Calle 72 desde la Estación 1-Av. Calle 72 hasta aproximadamente 300 m antes de la Estación 6-Av. Calle 80):
    - **Caracterización física:** el primer estrato identificado en esta zona es descrito como relleno antrópico y suelo con medio a alto contenido orgánico, el espesor de esta primera capa varía entre 1,2 y 3,0 m. Después de esta capa heterogénea se encontró que el perfil está compuesto por arcillas limosas con ocasional contenido de arena limosa, de humedad media a alta y plasticidad alta a muy alta, la profundidad inicial de este estrato varía entre

1,2 y 3,0 m, y la final lo hace entre 32,0 y 40,0 m. El inicio de la última capa identificada en la información secundaria varía entre 32,0 y 40,0 m está constituida por arcillas con bajo contenido de limos, humedad media y plasticidad media a alta, se encontró que estas condiciones se mantienen hasta 80,0 m de profundidad. En términos generales se puede decir que el perfil es homogéneo, con ocasionales lentes de arena limosa. La humedad máxima de los materiales en esta zona es de 216% y la media 102%, con una tendencia a decrecer con la profundidad. El índice de plasticidad promedio de los materiales es de 96%.

- **Resistencia:** para esta zona (y para la siguiente) se reporta la resistencia en términos de  $S_u$  (determinada en ensayos de compresión inconfiada, de veleta de campo y de compresión triaxial UU). Lo encontrado es lo siguiente: cerca a la superficie la resistencia tiene valores medios a altos (entre 100 y 150 kPa), a partir de los 5 m de profundidad se encontró un rápido descenso a valores del orden de 20 a 30 kPa. Aproximadamente a 8,0 m de profundidad se observó un ligero incremento llegando a valores entre 25 y 40 kPa a 10 m. A mayores profundidades el parámetro varía con magnitudes entre 30 y 50 kPa.

En términos de parámetros de resistencia efectiva, el principal hallazgo es que hay muy poca información, pero en esa que está disponible se encontró que: en las arcillas con contenido de materia orgánica  $\phi'$  varía entre  $12^\circ$  y  $14^\circ$  y  $c'$  entre 10 y 20 kPa, en las arcillas limosas  $\phi'$  varía entre  $18^\circ$  y  $25^\circ$  y  $c'$  entre 18 y 40 kPa. En las arenas encontradas en lentes los parámetros medios encontrados son:  $\phi'=30^\circ$  y  $c'=10$  kPa, el entregable, sin embargo duda de estos datos y plantea que la posibilidad de que hayan sido asumidos.
- **Compresibilidad:** no hay en el entregable una descripción detallada de la compresibilidad de los materiales de esta zona. Usando el mapa de Zonas de Respuesta Sísmica ([Anexo 1.](#)) se puede hacer una primera descripción del material, usando la velocidad de onda cortante reportada en los primeros 50 m de profundidad para las diferentes zonas:

  - Entre K0+470 y K0+890: el trazado atraviesa la unidad Aluvial 100. Esta, de forma general, es descrita como: suelo duro, que en términos granulométricos puede ser clasificado en un rango relativamente amplio que va desde arcillas limosas, pasa por arenas arcillosas y limos arenosos, llegando incluso a arenas limpias (encontradas en algunos lentes). La velocidad de onda cortante  $V_{s50}$  de la unidad varía entre 175 y 300 m/s.
  - Entre K0+890 y K0+975: la línea cruza la unidad Lacustre 100, la descripción de los materiales encontrados en esta zona sí coincide con lo presentado en el entregable: suelo lacustre blando (arcillas limosas o limos arcillosos con algunos lentes de turba), la velocidad  $V_{s50}$  en esta zona es menor a 175 m/s.
  - Entre K0+975 y K1+875: se atraviesa la unidad Lacustre 200.
  - Entre K1+875 y K8+950: la zona es Lacustre 300 –cabe anotar que la abscisa final de esta zona es K7+900–.
  - Las unidades Lacustre 100, Lacustre 200 y Lacustre 300 tienen la misma descripción general en la MZSB, y lo que cambia entre ellas es la profundidad “representativa” a la que se encuentra el basamento rocoso (100, 200 o 300 m).

La Relación de Sobreconsolidación, en el depósito lacustre de la ciudad, es superior a 4 en la parte más superficial del perfil (los primeros 5 a 8 m), tendiendo a valores del orden de 1,1 y 1,3 a mayor profundidad.

- **Niveles freáticos:** no hay información específica para esta zona homogénea. A manera de comentario general reportan que en la información secundaria las profundidades típicas están entre 2 y 4 m.
- **Comentarios:** la configuración del trazado a lo largo de esta zona es subterránea con avance mediante tuneladora, y el concepto emitido es que ese método constructivo es adecuado para el tipo de material predominante.

Las Zonas geotécnicas de la MZSB ([Anexo 2](#)) que atraviesa esta zona están asociadas con los siguientes comportamientos geotécnicos generales:

- La zona Aluvial, que está entre K0+104 y K0+878, como se mencionó antes, en la descripción de la Zona I, está compuesta por: “*suelos de mediana a alta capacidad portante (sic), poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto*”.
- La zona Lacustre A, que es atravesada empezando en la abscisa K0+878 y terminando en la K9+457 (cabe recordar que la zona planteada en el entregable termina en K7+900), está descrita como: “*Suelos de muy baja a media capacidad portante (sic) y muy compresibles .*”

○ **Zona III: K7+900 a K15+760 (aproximadamente 300 m antes de la Estación 6-Av. Calle 80 hasta el Patio Taller)**

- **Caracterización física:** el material identificado en esta zona es descrito con la siguiente secuencia de estratos:
  - Material de relleno antrópico y suelo con medio a alto contenido de materia orgánica, se encontró que este estrato tiene un espesor que varía entre 0,70 m y 2,40 m.
  - Desde una profundidad que varía entre 0,70 m y 2,40 m hasta 22,10 m, se identificó una arcilla con bajo contenido de limos, con humedad alta a muy alta y plasticidad alta a muy alta.

En términos de relaciones de fase se encontró que el perfil tiene un índice de plasticidad promedio de 98%, y humedad alta, con promedio de 103% y valor máximo de 242%, esta condición de humedad puede estar influenciada por la presencia de humedales en la zona (que es descrita como una conservación de las condiciones lacustres: condiciones que suelen estar asociadas con susceptibilidad a cambios volumétricos por la alta compresibilidad de los materiales).

- **Resistencia:** no hay en el entregable un análisis de la resistencia de este tramo en particular pues se parte de la relativa homogeneidad de los perfiles en el depósito lacustre. Ahora, sin poner en duda la homogeneidad de los perfiles, se puede hacer una descripción más detallada de resistencia y compresibilidad usando como base los mapas propuestos por la MZSB, como se muestra en los siguientes apartados.
- **Compresibilidad:** a continuación se muestra el avance del trazado sobre las Zonas de Respuesta Sísmica de la MZSB ([Anexo 1](#)).
  - Entre K8+950 y K9+785: Lacustre 200.
  - Entre K9+875 y K10+245: Lacustre 100.

- Entre K10+245 y K10+980: Lacustre 200.
- Entre K10+989 y K11+850: Lacustre 300.
- Entre K11+850 y el final del trazado: Lacustre 500.

Las zonas de respuesta mencionadas comprueban la hipótesis de homogeneidad, en el informe de la MZSB estas unidades son descritas como arcillas limosas o limos arcillosos con lentes de turba en algunos sectores, además de eso, el informe reporta que la velocidad de onda cortante en los primeros 50 m de profundidad en esas unidades es menor a 175 m/s.

- Niveles freáticos: no hay información específica para esta zona homogénea. A manera de comentario general reportan que en la información secundaria las profundidades típicas están entre 2 y 4 m.
- Comentarios: la tipología constructiva de este tramo es variada:
  - Entre las abscisas K7+900 y K12+280 se plantea que la línea sea subterránea y el avance se haga mediante tuneladora.
  - En la abscisa K12+280 la línea continúa siendo subterránea, pero se cambia a un sistema constructivo “cut and cover” con el que se avanza hasta K15+056. Con respecto a este segmento se recomienda considerar sistemas de codales (y anclajes, de ser necesario) que permitan garantizar la estabilidad de las excavaciones durante la construcción y a largo plazo, se plantea también la pertinencia de la instalación de sistemas de drenaje que permitan reducir la carga horizontal sobre las pantallas.
  - Desde K15+056 hasta el Patio-Taller la línea es elevada. En el tramo elevado el diseño geotécnico debe considerar alternativas de cimentación con grupos de pilotes para las pilas y en el Patio Taller el diseño se concentrará, en primera instancia, en la conformación de un relleno para la plataforma.

Una revisión de la Zonificación de Amenaza por Inundación adoptada por el Distrito con la Resolución 1641 de 2020 ([Anexo 5](#)) muestra que:

- Entre las abscisas K9+490 y K9+498: se cruza una zona clasificada como de Amenaza baja.
- Entre K9+498 y K9+502: el trazado atraviesa una zona de Amenaza media.
- Entre K9+502 y K9+529: Amenaza alta.
- Entre K9+529 y K10+304: Amenaza media
- Entre K10+304 y K10+405: Amenaza baja
- Entre K10+527 y K10+590: Amenaza baja
- Entre K10+980 y K11+265: se cruza una zona de amenaza baja, media y alta.
- Entre K11+538 y K11+600: se cruza una zona de amenaza baja, media y alta.
- Entre K15+065 y K15+748: Amenaza media
- Entre K15+748 y el Patio Taller: Amenaza Alta, con todo el lote del Patio Taller proyectado clasificado en Amenaza alta.

La zonificación de Amenaza por Inundación discutida representa escenarios de inundación por desbordamiento y en esa medida está controlada principalmente por la cercanía del trazado con: (1) el Humedal Tibabuyes, el Humedal Juan Amarillo y el Humedal La Conejera (2) el río Salitre, el río Bogotá y la Quebrada La Salitrosa.

➤ **Identificación y caracterización de amenazas de origen geotécnico:**

- Inundación por desbordamiento, principalmente en la Zona III, como se presentó en el apartado anterior y como se puede consultar en el [Anexo 5](#).
- La posibilidad de ocurrencia de presiones artesianas asociadas con la Falla Usaqué - Juan Amarillo, esto también en la Zona III. El trazado de esta falla se puede observar en el Mapa geológico de Santafé de Bogotá desarrollado por INGEOMINAS para el estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad desarrollado en 1997, presentado en el [Anexo 14](#).
- **Susceptibilidad de cambio volumétrico:** dado el carácter lacustre del depósito –arcillas de alta plasticidad y actividad– es posible encontrar este tipo de problemas; ahora, se reporta en el entregable que el contenido de agua del depósito actualmente es relativamente alto, sin embargo esta humedad muestra una tendencia a la disminución que en términos de cambios volumétricos se verá reflejada en un proceso de subsidencia.
- La subsidencia de la que se habla en el punto anterior se debe a procesos regionales de descenso de los niveles piezométricos asociados con extracción de agua del subsuelo, restricción de la infiltración y evaporación, además la urbanización, en la medida en la que incrementa las cargas sobre el depósito, termina acelerando el proceso. Este proceso puede causar en toda la ciudad asentamientos locales y contracciones del suelo que pueden causar graves agrietamientos en edificaciones, pavimentos y tramos superficiales de vías férreas.
- Siguiendo con el proceso de subsidencia, el entregable 5.1 reporta: *"En tales ejercicios, se dedujeron tasas de subsidencia bastante importantes, del orden de 7 centímetros por año en algunos sectores cercanos a las zonas industriales de Fontibón y Puente Aranda, fuera del área de proyecto, y del orden 0,5 a 3cm por año en la zona de la línea (SLMB), con los mayores valores sobre la calle 72, entre la Avenida Caracas y la Carrera 24. En el resto del recorrido, los valores deducidos, sin muchos datos, son inferiores a 2cm." (2.160)*
- Los valores de tasa de subsidencia encontrados en la revisión de información secundaria realizada en el Entregable 5.1 establecen dos zonas: (1) entre 2,5 y 3 cm/año sobre la calle 72 entre la Avenida Caracas y la Carrera 24, y (2) aproximadamente 2 cm/s en el resto del trazado.
- Para representar el proceso de subsidencia la ciudad en se construyó un mapa ([Anexo 17](#)) usando las velocidades calculadas en Mora-Paez, Diaz-Mila & Cardona (2020) mediante análisis comparativo de imágenes satelitales capturadas entre 2011 y 2017. Este mapa valida lo planteado en el Entregable 5.1:
  - El trazado está por fuera de las zonas con mayor velocidad de asentamiento, en esta referencia, sin embargo, se reporta una velocidad de desplazamiento menor (del orden de 3 cm/año en los puntos de mayor influencia del proceso).
  - Aproximadamente 5 segmentos del trazado atraviesan zonas de velocidad de asentamiento relativamente altos:

- Entre la Av. Caracas (K1+000) y la Av. NQS (K2+500) la velocidad es, aproximadamente, 1,3 cm/año. Al oriente de la Av. Caracas la velocidad es cercana a 0.
  - Entre la carrera 57 (K3+000) y la carrera 64 (K3+800) se atraviesa una zona con velocidades del orden de 1,0 cm/año.
  - Entre la carrera 69 (K4+800) y la carrera 71B (justo antes de la Av. Boyacá–K5+600) las velocidades se acercan a los 2,0 cm/año.
  - Entre la carrera 72a (K5+900) y el K7+700 (Av. Ciudad de Cali con calle 75) las velocidades varían entre 1,5 y 2,5 cm/año.
  - Y finalmente, en la zona final del trazado las velocidades con valores del orden de 1,0 cm/año.
- Otro mecanismo contribuyente a la subsidencia en la ciudad, identificado en los estudios de la Primera Línea del Metro de Bogotá es la mala impermeabilización de sótanos solucionada mediante sistemas de bombeo. Este mecanismo, sin embargo, no se espera en el trazado de la Línea 2, en la medida en la que la mayoría de las edificaciones en la zona de influencia del corredor son relativamente antiguas, de baja altura y cimentadas superficialmente.
  - Licuación y ablandamiento cíclico: por la naturaleza del depósito no se espera la ocurrencia de procesos de licuación (este proceso no es común en suelos arcillosos y los estratos arenosos están confinados y no pueden drenar en eventos de carga cíclica). Se señala, sin embargo, que es necesario analizar el comportamiento de los materiales blandos en eventos de carga cíclica, especialmente en las zonas en las que se ha proyectado la construcción de estaciones y estructuras elevadas.
  - Otra amenaza identificada –más relacionada con la construcción del túnel– es la posible presencia de gases tóxicos producidos en las capas de material orgánico intercaladas en el depósito.
  - Amenaza sísmica: en términos normativos el entregable establece una condición importante: *“En etapas subsiguientes para la recomendación (sic) de los espectros de respuesta de los túneles y puentes o viaductos, se deben adelantar estudios de respuesta sísmica local, a partir de información directa, para los cuales se deben realizar dos modelos, uno partiendo del NSR-10, para periodo de retorno de 475 años (en el caso de edificaciones y estaciones) y otro ajustando el espectro de la Microzonificación Sísmica de Bogotá para un periodo de 1000 años, como exige el CCP-14” (2.181).*
  - Los otros comentarios relacionados con la amenaza sísmica están condicionados por la falta de información y parten de una suposición en el tipo de perfil de suelo, en esa medida, solo tienen validez a nivel de prefactibilidad, como efectivamente se plantea en el texto. La recomendación para etapas futuras es, como se mencionó antes, la ejecución de estudios de sitio a lo largo del trazado.

**Conclusiones del estudio de prefactibilidad:**

Las conclusiones principales del entregable se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Los suelos presentes a lo largo del trazado son de origen lacustre y aluvial (Formación Sabana/Terraza Alta), y el basamento rocoso, en casi la totalidad del trazado puede estar a profundidades mayores a 100 m. En esa medida, las obras serán ejecutadas y cimentadas en suelos blandos, sin alcanzar roca. Se espera encontrar estratos delgados de arenas en dos sitios: cerca a la avenida Caracas (estratos delgados de densidad media) y al pie de los Cerros de Suba (bancos profundos de arena aluvial)
- En la medida en la que el proceso de subsidencia puede verse acelerado por la influencia de las obras de la Línea 2 del Metro, se plantean como necesidades fundamentales:
  - El conocimiento de las propiedades de consolidación, compresibilidad y permeabilidad del material.
  - La construcción de modelos de acumulación y drenaje que permitan entender la influencia de las obras en el proceso.
  - El seguimiento de las presiones piezométricas en la zona de influencia del trazado.
  - Ahora, a largo plazo se plantea un escenario en el que este proceso puede generar cargas adicionales en las estructuras subterráneas: se espera una renovación urbanística en el eje Calle 72-Calle 68 del corredor, ese desarrollo puede acelerar el proceso de subsidencia por la influencia de cimentaciones profundas y sótanos (con los asentamientos consiguientes). El entregable recomienda, para etapas futuras del proyecto, la caracterización de las edificaciones existentes (en términos de sus sistemas de cimentación) y una proyección de cambio de éstas, que permita estudiar el comportamiento de la infraestructura en escenarios futuros.
  - La caracterización de las edificaciones en la zona de influencia del corredor, para la predicción y estudio del efecto (vectores de desplazamiento que permitan evaluar, además de la componente vertical, distorsiones y deformaciones diferenciales) que sobre ellas tendrá la construcción del túnel.
- Un segmento del trazado que sobresale –por su heterogeneidad– es la primera parte de la línea en donde se espera encontrar un depósito de materiales relativamente gruesos de origen coluvio-aluvial (esto debe ser validado pues existe también la posibilidad de encontrar rellenos antrópicos). La exploración geotécnica de la zona debe permitir la ejecución de análisis comparativos de metodologías constructivas, en los que los siguientes factores son de gran importancia:
  - La delimitación (distribución y alcance) de los materiales.
  - Comportamiento de los materiales en eventuales excavaciones.
  - Condiciones hidrogeológicas.
- En términos de las recomendaciones constructivas el entregable plantea, de manera preliminar, las siguientes:
  - Para el sector de la Cola de Maniobras: sistema “Cut and Cover”.
  - Para el corredor de la ALO (en la medida en la que existe una zona amplia para la construcción, sin edificios cercanos que puedan resultar afectados) el sistema “Cut and Cover”.
  - Para los tramos en los que se opte por la construcción con tuneladora EPB se debe considerar el uso de técnicas de protección de la integridad de las edificaciones cercanas. Entre las técnicas mencionadas están: submuraciones, pantallas, pilotes, micropilotes, inyecciones, reinyecciones y carpas canadienses.



	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Para las zonas de viaducto se prevé la necesidad de cimentaciones profundas (pilotes o barretes de longitudes mayores a 50 m). En estos sistemas de cimentación, dada la naturaleza de los suelos en los que se proyecta su construcción se debe considerar la posibilidad de fricción negativa por desecación y subsidencia.</li> </ul> <p>Como es lógico, el principal punto a mejorar a corto plazo es la falta de caracterización geotécnica del trazado. Apuntando a solucionarlo es que se plantea el <a href="#">Plan de Exploraciones</a> (L2MB-L02-IFU-M-0001 RF-Plan de exploraciones). La información que se consiga en el marco de este Plan permitirá reducir las incertidumbres en términos del comportamiento del suelo, en puntos importantes como:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● El tramo inicial del trazado, entre las carrera 7 y 11, en donde es importante entender las condiciones especiales del depósito coluvio-aluvial.</li> <li>● El lote en el que se proyecta el Patio Taller, que está bajo la influencia de los Humedales Tibabuyes, Juan Amarillo y La Conejera, pues en este sitio será necesario el planteamiento de condiciones especiales de mejoramiento.</li> <li>● En general en todo el trazado de la Línea, pues se va a caracterizar detalladamente la compresibilidad y permeabilidad de los materiales.</li> </ul> <p>Además de tener en cuenta las consideraciones especiales en esos puntos, el Plan fue estructurado para cumplir con las exigencias de la especificación técnica ET-10 – Geotecnia y pavimentos, que se discute a continuación.</p>	
Ítem	Aspectos relevantes	¿Cómo atenderlos en el marco de la asesoría técnica?
<p><b>Estudios de geología</b></p>	<p>La Especificación Técnica plantea: <i>“El Contratista debe en primer lugar consultar estudios previamente ejecutados, mapas y bibliografía, para luego establecer características geológicas realizando en esta actividad el mapeo detallado del terreno, especialmente de los taludes, con indicación de fallas geológicas y de la estructura litológica a lo largo del trazado, determinará el perfil geológico y efectuará el análisis geológico estructural. El estudio se efectuará en base a mapas topográficos o de restitución fotogramétrica a escala 1:25.000 o menos o de imágenes satelitales con escala 1: 1000000. Se realizará la evaluación de la estabilidad de los taludes existentes, en los sectores rocosos. Se examinará las propiedades de los materiales de relleno y se pondrá particular énfasis en la investigación geológica de los sectores críticos</i></p>	<p>Se está construyendo una colección de mapas con temáticas relacionadas con el componente geotécnico (se presenta como <a href="#">Anexo</a> a este informe): geología, geomorfología, zonificaciones geotécnicas y de respuesta sísmica. A partir de esa colección se hará un análisis que complemente lo presentado en este documento.</p> <p>Hay un punto importante: dada la localización y las características del proyecto, no será necesario desarrollar la estabilidad de taludes rocosos.</p>

	<p><i>identificados. Se examinarán las superficies expuestas. Igualmente, se realizará la caracterización de las posibles fuentes de materiales.”</i></p>	<p>Se ha avanzado también en la recopilación de fotografías aéreas del trazado de la Línea 2, por ahora se ha conseguido información relativamente reciente que se presenta en los siguientes anexos:</p> <p><a href="#">Anexo 8.</a> Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA) de la ciudad en el año 2017.  <a href="#">Anexo 9.</a> Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA) de la ciudad en el año 2014.  <a href="#">Anexo 10.</a> Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA) de la ciudad en el año 2010.  <a href="#">Anexo 11.</a> Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA) de la ciudad en el año 2007.  <a href="#">Anexo 12.</a> Trazado de la Línea 2 sobre la Ortofotografía (IDECA) de la ciudad en el año 2004.  <a href="#">Anexo 13.</a> Trazado de la Línea 2 sobre una aerofotografía de la ciudad de Bogotá en el año 1967. Mala calidad.</p> <p>El análisis comparativo de estas fotografías no ha permitido identificar cauces antiguos o rellenos recientes en la zona de estudio, esto se debe principalmente a las fechas y la calidad de las imágenes conseguidas. Sin embargo, teniendo en cuenta que el análisis multitemporal puede revelar condiciones geológicas y geotécnicas relevantes para el diseño de la L2MB, se va a incluir en la etapa de factibilidad –como parte de la caracterización geológica-geotécnica– un análisis detallado, con más fotografías (y de mayor escala).</p>
<p><b>Estudios geotécnicos</b></p>	<p>La Especificación Técnica plantea: <i>“Como producto del reconocimiento visual de la zona de proyecto, así como también del proceso de búsqueda y análisis de información, el Contratista debe establecer características geotécnicas, en las cuales se identificarán las propiedades físicas y mecánicas del subsuelo, la localización sísmica, geotécnica y la existencia de amenazas como la remoción en masa o inundación; a partir de las cuales se dan las respectivas recomendaciones geotécnicas, que incluyan criterios generales de cimentación para estructuras principales, redes de servicios públicos, potenciales problemas de estabilidad, así</i></p>	<p>La ET10 requiere la generación de recomendaciones geotécnicas relacionadas con la cimentación de estructuras principales, redes de servicios públicos y evaluación de las posibles afectaciones de las edificaciones existentes durante la etapa de construcción del proyecto. Para abordar este punto se lo puede dividir en dos objetivos:</p>



	<p><i>como también el grado de riesgo y posible afectación de las construcciones existentes frente a las obras que resultarán de los estudios y diseños de los presentes Términos de Condiciones Contractuales”.</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <u>Establecer las características geotécnicas (propiedades físicas y mecánicas del subsuelo).</u> El cumplimiento de este objetivo se logrará en la medida en la que vaya avanzando el <a href="#">Plan de Exploraciones</a> presentado en el documento No. L2MB-L02-IFU-M-0001_VF. Por supuesto, en la medida en la que se avance en la caracterización será posible empezar la formulación de los análisis tanto: los relacionados con el diseño de cimentaciones de las estructuras como los relacionados con la evaluación de la afectación del entorno.</li> <li>● <u>Identificar la localización en el contexto sísmico, de amenazas de origen geotécnico.</u> Parte de este objetivo se empieza a cumplir en el desarrollo de este documento pues se presenta un análisis general del emplazamiento con respecto a las zonificaciones de amenaza por inundaciones y movimientos en masa, y con respecto a las zonificaciones que hacen parte del Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.</li> </ul>
<p><b>Pavimentos y espacio público asociado</b></p>	<p>La Especificación Técnica plantea: <i>“Con el propósito de establecer las características y condiciones de las infraestructuras pertenecientes al proyecto, así como también de orientar el planteamiento de intervención y diseño de pavimento y espacio público asociado, el Contratista debe realizar la identificación, inventario y diagnóstico de las estructuras existentes del tramo en estudio, y como resultado debe producirse la respectiva cartografía a escalas avaladas por la el Contratante y la Interventoría, llevando un cuidadoso registro fotográfico de todo el reconocimiento visual y el correspondiente inventario de las condiciones geotécnicas más importantes del proyecto”.</i></p>	<p>Este aspecto será atendido por medio de visitas a las zonas de influencia de las estaciones<sup>3</sup>, pues es en esos sectores en los que se hará falta diseño de pavimentos y espacio público. El resultado de esas visitas será plasmado en los registros fotográficos y planos correspondientes.</p> <p>Además, las estructuras de pavimento que resulten dentro de las zonas de influencia de las estaciones serán caracterizadas según lo establecido en el numeral 3.3.7 del <a href="#">Plan de Exploraciones</a> presentado en el documento No. L2MB-L02-IFU-M-0001_VF.</p>

<sup>3</sup> Entendiendo esas zonas de influencia como las vías involucradas en los planes de desvíos necesarios durante la construcción de las obras.

<p><b>Localización de redes de servicios para perforaciones</b></p>	<p>La Especificación Técnica plantea: <i>“El grupo encargado de realizar los sondeos del subsuelo, por parte del Contratista, estará en estrecha comunicación con el grupo encargado de realizar la investigación de redes de servicios existentes, con el fin de compartir información que pueda ser útil para ambos y que se presentará mediante un informe y planos”.</i></p>	<p>El grupo encargado de los sondeos ha estado en contacto con las empresas dueñas de la infraestructura subterránea para coordinar el trabajo y evitar alteraciones a la misma. Una primera aproximación a la localización de la Red Matriz del Acueducto se puede consultar en el <a href="#">Anexo 7</a>.</p> <p>Se habla de primera aproximación pues la información conseguida hasta ahora no incluye la profundidad de instalación de la tubería, ese dato, y en general lo relacionado con las otras redes con las que se pueda generar interferencia en el proyecto se puede encontrar en el capítulo de esta Debida Diligencia dedicado a la <a href="#">ET09</a>, en la medida en la que ese componente avance se podrá analizar con detalle la influencia que la Línea 2 va a tener sobre las redes de servicios públicos.</p> <p>Por otra parte, existe comunicación permanente entre los equipos de diseño y los resultados de la investigación de redes de servicios existentes se tiene en cuenta en las consideraciones geotécnicas.</p>
<p><b>Exploración del subsuelo - Campaña de reconocimiento de campo</b></p>	<p>La Especificación Técnica plantea: <i>“Las actividades de exploración del subsuelo están orientadas a determinar las características geológico-geotécnicas de los terrenos afectados por el trazado de la línea de Metro. Para lograr su finalidad, se realizarán los sondeos que se determinan en el proyecto de reconocimiento, de los cuales se obtendrán las muestras necesarias para determinar con precisión razonable la caracterización geotécnica de los materiales y establecer posteriormente el modelo geológico-geotécnico de análisis.</i></p> <p><i>Así mismo, la exploración del subsuelo deberá estar enfocada en la identificación, tanto de las acciones a considerar sobre la infraestructura a nivel, como el método constructivo más adecuado para la realización de las fundaciones de las estructuras del sistema. Para alcanzar este objetivo, se realizarán las pruebas de campo necesarias, con el fin de</i></p>	<p>La campaña de exploración está actualmente en marcha, y está explicada y justificada en el <a href="#">Plan de Exploraciones</a> presentado en el documento No. L2MB-L02-IFU-M-0001_VF.</p> <p>Como resultado del Plan de Exploraciones se construirá el modelo geológico-geotécnico que este apartado de la ET10 plantea como objetivo. Modelo que será usado en el análisis y dimensionamiento de las estructuras del sistema.</p>

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

	<i>establecer las características mecánicas y de resistencia de los diferentes estratos o capas de suelo encontradas en los registros de perforación.”</i>	
<b>Exploración geotécnica para taludes</b>	La Especificación Técnica plantea: <i>“La Información que deberá ser obtenida a partir de sondeos, barrenos, apiques o trincheras. Se realizarán mínimo dos (2) exploraciones geotécnicas por talud, localizadas de tal forma tal que se pueda obtener un perfil geotécnico típico.”</i>	No hay taludes que se ajusten a lo que se plantea en esta sección de la ET10 a lo largo del trazado proyectado.
<b>Exploración geotécnica para redes húmedas</b>	La Especificación Técnica plantea la necesidad de identificar las interferencias de redes húmedas con el trazado del proyecto, textualmente el requerimiento es: <i>“Se deberá realizar como mínimo 1 sondeo o barreno o apique en el área de influencia directa del proyecto en el que se evidencie la interferencia con redes húmedas.”</i>	Para este objetivo se destinó un total de 200 m de perforación. Cabe mencionar que este componente del Plan de Exploración será ejecutado en la Fase 2 de los trabajos de campo. Como resultado de este punto del Plan de exploraciones se tendrá una caracterización física y mecánica de los materiales encontrados.
<b>Exploración geotécnica para pavimentos</b>	La Especificación Técnica plantea: <i>“De acuerdo con los requerimientos del proyecto y con la información secundaria disponible, se debe afinar la información de los parámetros geo-mecánicos de los suelos y estructura existente de pavimento que conforman los corredores viales, de esta forma la exploración se deberá ver como una ampliación y/o actualización a lo existente. El Contratista deberá proyectar la exploración de acuerdo con la magnitud de la obra específica sin desconocer los datos existentes y de acuerdo con el presupuesto especificado.”</i>	Como se mencionó antes, la caracterización de la estructura de los pavimentos en la zona de influencia del proyecto se limitará a las vías que hagan parte de los planes de desvíos que haga falta implementar durante la construcción de las estaciones.
<b>Ensayos y actividades de campo</b>	La Especificación Técnica plantea en la sección 3.1.9 del documento las condiciones bajo las que se deben desarrollar las actividades de exploración (perforación, muestreo y ejecución de pruebas in-situ).	En el <a href="#">Plan de Exploraciones</a> presentado en el documento No. L2MB-L02-IFU-M-0001_VF se presenta una propuesta de trabajos de campo que se ajusta a lo establecido en la Especificación.
<b>Ensayos de laboratorio</b>	La Especificación Técnica plantea: <i>“Sobre las muestras obtenidas en las actividades de campo, se realizarán todos los ensayos necesarios para conseguir la adecuada caracterización del suelo atravesado, tanto desde</i>	En el <a href="#">Plan de Exploraciones</a> presentado en el documento No. L2MB-L02-IFU-M-0001_VF se presenta una propuesta de

	<i>el punto de vista del diseño como de la construcción, definiendo los parámetros geotécnicos básicos al efecto.”</i>	cantidades de ensayos de laboratorio que se ajusta a lo establecido en la Especificación.
<b>Investigación geofísica</b>	<p>La Especificación Técnica plantea: “Las actividades de exploración geofísica estarán encaminadas a complementar el modelo geológico-geotécnico de análisis, junto con la caracterización de los materiales encontrados durante la campaña geotécnica. En general, su programación debe evaluar los siguientes aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Determinación de la estratigrafía y posición del nivel freático en el perfil geotécnico.</i></li> <li>• <i>Identificación de acuíferos y zonas de fallas geológicas, presencia de discontinuidades y zonas fracturadas.</i></li> <li>• <i>Perfil de velocidades de ondas de corte (Vs), ondas de compresión (Vp) y resistividades en el terreno.</i></li> <li>• <i>Identificación de la profundidad del basamento rocoso y/o zonas con alto contraste de impedancia.</i></li> <li>• <i>Tomografía eléctrica y sísmica del perfil geotécnico.</i></li> <li>• <i>Localización de redes de servicios y estructuras enterradas.”</i></li> </ul>	<p>En la sección 3.3.8 del <a href="#">Plan de Exploraciones</a> presentado en el documento No. L2MB-L02-IFU-M-0001_VF se presenta el componente de Exploración geofísica del plan de exploración.</p> <p>Se va a desarrollar con los siguientes procedimientos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Líneas MASW y MAM de 100 m cada 600 m de trazado del proyecto.</li> <li>• Ensayos Downhole.</li> <li>• Ensayos SCPTu.</li> </ul>
<b>Aspectos críticos por atender</b>	<b>A corto plazo para el desarrollo de las actividades de ingeniería de factibilidad (Aval Técnico y Fiscal – Fase 2)</b>	<b>A mediano plazo para el desarrollo de las actividades de Estudios y Diseños para la Estructuración (Fase 3)</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se debe definir un predimensionamiento de todas las estructuras y edificaciones.</li> <li>• Evaluación de alternativas y diseño geotécnico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Complementación de los modelos geológicos-geotécnicos.</li> </ul>

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

<b>Interfaces:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diseño de túneles.</li><li>• Diseño estructural.</li><li>• Interferencias con redes de servicios.</li></ul>
<b>CAPEX y OPEX</b>	N/A
<b>Otros aspectos relevantes</b>	<p>Toda la información secundaria analizada en este documento será tenida en cuenta en la Factibilidad Técnica para la caracterización geológica y geotécnica del corredor, además de lo analizado en este documento, esa caracterización se va a incluir información de exploración y caracterización de otros proyectos en los que el asesor ha participado.</p> <p>Análisis más detallados en lo relacionado con interferencias con redes de servicios y con pavimentos se van a desarrollar en la Factibilidad en la medida en la que avance, por un lado, la identificación y caracterización de las redes pues con ese insumo se podrá analizar la influencia que la Línea 2 tendrá en los ductos, y por otro lado la definición de los planes de desvíos en las zonas aledañas a las estaciones pues así se podrá delimitar la zona en la que es necesario el diseño de pavimentos o espacio público.</p> <p>Se desarrolló el 16 de noviembre de 2021 un recorrido por el trazado del proyecto. Las observaciones más relevantes se presentan a continuación:</p>



Fotografía 1. K0+000.

Esta fotografía fue tomada desde la abscisa K0+000, y muestra lo que será el primer tramo de la línea. Es importante notar la altura de las edificaciones en esta zona de la ciudad (del orden de 20 pisos).

En este tramo se ha proyectado la cola de maniobras y en principio la construcción se desarrollará mediante el método "Cut and Cover". Ahora, hay dos puntos que vale la pena mencionar:

- Es posible que estas edificaciones de gran altura tengan también varios niveles de sótanos. Es importante, antes de empezar la construcción, consultar cuál es el manejo que se está dando al agua superficial en esos niveles subterráneos. Además, es posible que estos niveles subterráneos tengan obras de estabilización que involucren anclajes, esto se debe tener en cuenta en el diseño de las obras en esta zona del corredor. Las consideraciones e implicaciones en el diseño de esta situación serán en el diseño de las obras subterráneas, asociadas a las ET24 y 25.
- En esta zona de la ciudad, por las características constructivas señaladas se debe plantear un plan de instrumentación y monitoreo de desplazamientos más riguroso que en el resto del trazado (en el que, como se muestra más adelante, la tipología de las construcciones es completamente diferente).





Fotografía 2. K0+285

Esta fotografía fue tomada desde la intersección de la calle 72 con la carrera 9. Muestra cierto cambio en la tipología de las edificaciones que rodean el trazado de la línea: tienden a reducir su altura. Esta tendencia se hace más evidente en la medida en la que el trazado avanza hacia el occidente.



Fotografía 3. K0+285.

Esta fotografía y la anterior fueron tomadas desde el mismo punto, pero esta muestra el corredor hacia el occidente. En esta se puede ver que aun hay edificaciones relativamente altas que deben ser estudiadas y monitoreadas detalladamente durante la etapa de construcción del proyecto.



Fotografía 4. K0+530.

Estación 1. En este punto se proyecta la primera parada de la Línea 2. A la izquierda de la fotografía se puede ver la Iglesia de La Porciúncula.

Es interesante notar que la transición en métodos constructivos – pasando de “cut and cover” a tuneladora– está proyectada a la altura del centro comercial Avenida Chile, en la abscisa K0+450, detrás de la iglesia.

Más adelante en este documento se describe el contexto geotécnico de este sitio pues en la intersección entre la Calle 72 y la Carrera 11 se cruza el trazado de la Línea 2 con el propuesto para la Línea 1 (proyecto subterráneo de 2015).



Fotografía 5. K0+530.

Estación 1. Esta foto fue tomada desde el mismo punto que la anterior; en esta se muestra la carrera 11 hacia el sur. Y este punto es relevante pues es el emplazamiento seleccionado para la primera parada de la Línea.

Es importante notar la altura de las edificaciones: del orden de 10 pisos.



Fotografía 6. K0+770.

Inicio del deprimido (viendo al oriente): una de las obras auxiliares de la Línea 1 (actualmente en construcción) es un paso deprimido que va a atravesar la intersección de la Calle 72 y la Av. Caracas. En la fotografía se muestra el que será el punto de acceso a esa obra.



Fotografía 7. K0+800.

Las obras del paso deprimido mencionado en la fila anterior ya están en ejecución y las carpas y polisombra mostradas en la fotografía de la izquierda pertenecen a ese proyecto.

Una descripción detallada de este paso se puede encontrar más adelante en esta sección y también en el análisis de la ET24.



Fotografía 8. K0+890.

Intersección Av. Caracas. Esta fotografía muestra la intersección de la calle 72 y la Av. Caracas, en la fotografía, a la izquierda de la imagen se puede ver el avance en labores de demolición de una antigua edificación.

Desde el punto de vista geotécnico este es un punto importante pues a esta altura en el mapa de zonas geotécnicas de la [Anexo 2](#) Microzonificación Sísmica de la ciudad está trazada la frontera entre los suelos de origen aluvial (al oriente de la Av. Caracas) y los de origen lacustre (al occidente). Esta condición se estudia (y se confirma) más adelante en el análisis del diseño geotécnico del paso deprimido.

Es interesante notar el cambio en la tipología de las edificaciones que rodean el trazado de la línea: desde la Av. Caracas hacia el occidente de la ciudad la altura de las edificaciones se reduce considerablemente. También, en algunas edificaciones hay indicios de asentamientos relativamente altos.

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



Fotografía 9. K1+150.

Cambio de la tipología estructural. Esta fotografía muestra lo que se empezó a mencionar en la fila anterior: las edificaciones tienen 3 o menos pisos.



Fotografía 10. K1+290.

En esta fotografía se muestra un desnivel en la entrada al garaje de una edificación, este podría ser efecto de los asentamientos sufridos por la estructura.



Fotografía 11. K1+460.

Esta foto fue tomada mirando hacia el oriente y confirma la predominancia de edificaciones de baja altura.



Fotografía 12. K1+580. HUB 72.

La predominancia de edificaciones de baja altura se rompe en la intersección entre la calle 72 y la carrera 24 en donde una estructura relativamente nueva da una muestra de lo que en el Entregable 5.1 se plantea como la progresiva renovación que va a experimentar el corredor. Esto es relevante por dos razones:

- Edificaciones de esta altura suelen tener también varios niveles de sótanos en los que por filtraciones puede ser necesario el bombeo de aguas subsuperficiales, lo que puede acelerar de forma local el proceso de subsidencia que experimenta la ciudad de Bogotá. El Entregable 5.1 señala la interacción entre la subsidencia causada por estas nuevas edificaciones y la infraestructura subterránea del Metro como uno de los puntos fundamentales en el estudio del comportamiento del proyecto a largo plazo.

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

- Esta edificación, debe ser considerada con especial atención en la formulación de planes de monitoreo y control de desplazamientos durante la construcción y operación de la Línea.



Fotografía 13. K2+500.

Esta fotografía muestra el puente peatonal que cruza la Avenida NQS y conecta con la Estación Avenida Chile de TransMilenio.

Es importante mencionar que en esta abscisa está proyectada la segunda estación de la línea, que estará al norte de lo mostrado en esta imagen.





Fotografía 14. K2+560.

Bajo el separador de la NQS que se muestra en esta fotografía (tomada mirando hacia el oriente) y atravesando la avenida está proyectada la Estación Av. NQS. No sobra señalar que sobre el separador está el corredor del Tren de la Sabana.



Fotografía 15. K2+600.

Final de la estación Av. NQS. Esta fotografía muestra el muro de aproximación al puente, es interesante notar que por la forma en la que fue construida la estructura, la transición del tablero del puente a la aproximación quedó oculta y no es posible observar desde el costado del puente si existe o no asentamiento diferencial, ese asentamiento, sin embargo, sí se puede sentir cuando se transita sobre la estructura pues hay un cambio en la pendiente relativamente brusco en ese punto.

Ahora, durante la Factibilidad Técnica se va a estudiar la influencia que la construcción del túnel y la estación va a tener sobre el puente y en particular sobre la estructura de aproximación. También durante la Factibilidad, de ser necesario, se hará la búsqueda de alternativas de mitigación de las posibles afectaciones que pueda sufrir el puente como consecuencia de las obras de la Línea 2.





Fotografía 16. K2+975.

El siguiente punto importante en el recorrido de la Línea es el cruce con el Canal Salitre, que se muestra en esta fotografía.

En este cruce se ha proyectado que el Túnel pase 10 m bajo el fondo del canal.

El proceso constructivo que se ha planteado para la Línea 2 – tuneladora EPB– permitirá controlar razonablemente los asentamientos y en general las afectaciones en superficie que pueda llegar a generar la construcción del Túnel, esas afectaciones se estudiarán en la Factibilidad Técnica, y de ser necesario –para mitigarlas– se puede proponer, por ejemplo, pasar con el túnel a una profundidad mayor a la planteada actualmente, otra alternativa para reducir potenciales afectaciones puede ser el mejoramiento del terreno mediante inyecciones.





Fotografía 17. K3+640.

Avanzando por el corredor se mantiene la tendencia: predominan las edificaciones relativamente bajas.

Vale la pena mencionar que una de las actividades de la Factibilidad Técnica será la evaluación –en un área de influencia alrededor del corredor– de las posibles desplazamientos y asentamientos que pueda generar la construcción de la infraestructura subterránea, en esa evaluación va a entrar la Iglesia del barrio 12 de Octubre.



Fotografía 18. K4+250.

Puente Av. 68. En este punto el trazado cruza el segundo puente vehicular: el de la Av. 68, en la fotografía se muestra el asentamiento diferencial tablero-aproximación en el costado oriental del puente.



Fotografía 19. K4+310.

Esta foto fue tomada viendo hacia el occidente y muestra el trazado proyectado de la Línea y la localización de la estación Av. 68.

Cabe mencionar que en este mismo punto está proyectada una estación del sistema Transmilenio de la Alimentadora de Metro de la Av. 68 (actualmente en construcción) y el puente peatonal que conecta los dos costados de la Carrera 68 –que será cimentado con pilotes– puede generar cierta interferencia con la estación planteada.

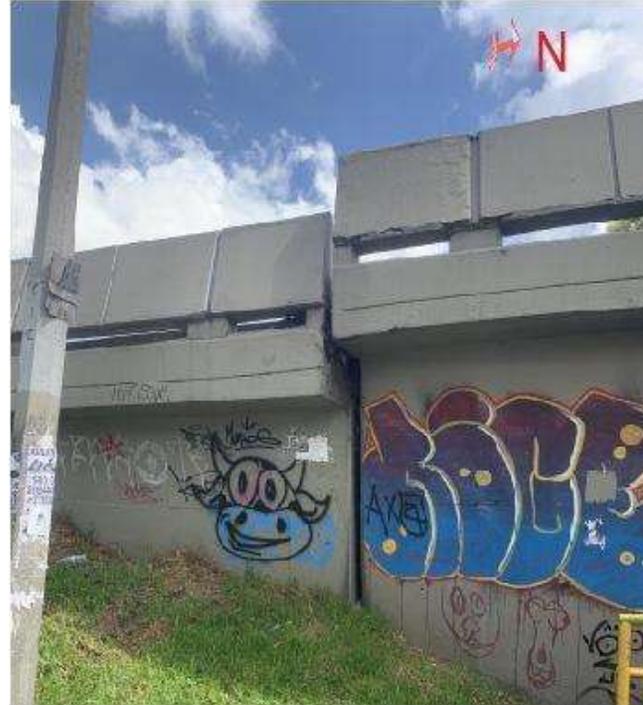


Fotografía 20. K4+370.

Estación Av. 68. Viendo al oriente. Esta foto muestra el mismo sitio que la mostrada en la fila anterior, pero fue tomada del costado opuesto de la carrera 68 y apuntando hacia el oriente.

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



Fotografía 21. K4+420.

Puente Av. 68. Costado Occidental. Esta fotografía muestra el alto asentamiento diferencial tablero-aproximación que ha experimentado el puente que cruza la Av. 68. Esta foto corresponde al costado occidental del puente.

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



Fotografía 22. K4+580.

En esta fotografía se muestra la tipología constructiva predominante en las edificaciones entre la Av. 68 y la Av. Boyacá: construcciones independientes, de baja altura y seguramente cimentadas superficialmente.



Fotografía 23. K5+710.

Asentamiento diferencial tablero-aproximación Puente Av. Boyacá. Costado oriental. El puente que cruza la Av. Boyacá es el tercero que atraviesa la Línea 2 del Metro. La interacción entre la aproximación y el tablero en este puente es diferente a la observada en el puente de la Av. 68. En este caso se puede observar que la losa de aproximación está "colgada" del estribo del puente.



Fotografía 24. K5+810.

Esta fotografía capturada desde el costado occidental de la Av. Boyacá muestra el recorrido de esa avenida hacia el sur. Vale la pena notar (aunque en la foto se ve muy pequeño, al fondo) un ducto de unas 36" que descarga al canal que se muestra a continuación.



Fuente: Google Earth.



Fotografía 25. K5+840.

Esta foto (tomada apuntando al oriente) muestra la localización proyectada para la Estación Av. Boyacá (la cuarta del trazado). El separador mostrado en esta imagen es el mismo que se muestra en la fila anterior.



Fotografía 26. K5+800.

Junto al puente de la Av. Boyacá, al norte, hay un conjunto de torres relativamente altas para la zona. Este es el segundo ejemplo (el primero observado en la intersección entre la calle 72 y la carrera 24) de la evolución en términos urbanísticos que va experimentando la ciudad.

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



Fotografía 27. K6+910.

Edificaciones típicas en la zona de la estación Av. Ciudad de Cali, la quinta del trazado. En este sector se observó, con cierta frecuencia, la presencia de edificaciones de 4 pisos, como muestra también la siguiente fotografía.

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



Fotografía 28. K6+990.

Algunas edificaciones relativamente altas en la “zona de influencia” de la estación Av. Ciudad de Cali.

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



Fotografía 29. K8+210.

Foto tomada desde la Calle 80. Al fondo se ve el puente peatonal que conecta la estación de TM y atrás el puente vehicular de la Av. Ciudad de Cali. Lo mostrado en la fotografía corresponde al trazado de la Línea 2, que atraviesa la calle 80 bajo la edificación con grafiti. En esta zona está localizada la sexta estación del trazado: llamada Av. Calle 80.



Fotografía 30. K8+260.

El trazado pasa bajo la pasarela que conecta el puente peatonal y la estación.



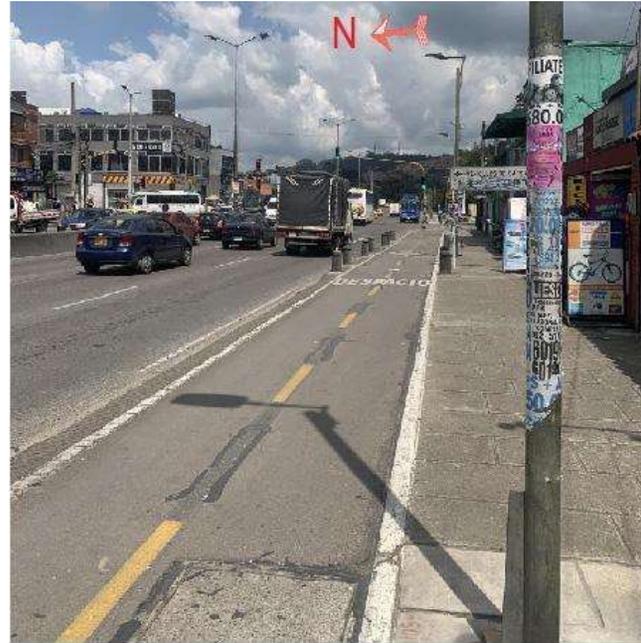
Fotografía 31. K8+370.

El eje del trazado de la línea está a aproximadamente 65 m al oriente de este puente, sin embargo, se puede ver que de forma similar a lo observado en el puente de la Av. Boyacá la losa de la aproximación al puente está empezando a “colgarse” del estribo del puente.



Fotografía 32. K8+755.

Esta fotografía muestra la tipología estructural típica en la zona del trazado que va por la Av. Ciudad de Cali, hay diversidad de alturas, con conjuntos de edificios de hasta 6 pisos y unidades individuales de dos o tres pisos.



Fotografía 33. K9+255.

Foto viendo al nororiente. Zona de influencia de la estación Carrera 91.

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



Fotografía 34. K9+255.

Foto viendo al suroccidente. Zona de influencia de la estación Carrera 91.



Fotografía 35. K9+470.

Foto viendo al noroccidente. Se muestra parte de la estructura que atraviesa el Canal Salitre. En la siguiente fila se puede ver el resto del Box Culvert.





Fotografía 36. K9+470.

Esta foto fue tomada viendo hacia el norte. El trazado de la Línea 2 sigue la orientación con la que fue tomada la fotografía y debe pasar bajo el canal.



Fotografía 37. K10+290.

En esta fotografía –que fue tomada con dirección al suroriente– se muestra la Av. Ciudad de Cali en la zona de influencia de la Estación Humedal, el Humedal Juan Amarillo está a la izquierda en esta imagen.



Fotografía 38. K10+290.

Esta fotografía fue tomada apuntando hacia el noroccidente, y muestra la zona de influencia de la estación Humedal, en ésta el humedal Juan Amarillo está a la izquierda.



Fotografía 39. K11+620.

En esta fotografía se muestra uno de los apoyos del puente que atraviesa el canal de uno de los brazos del humedal Juan Amarillo.



Fotografía 40. K12+065.

Inicio de la intersección del trazado con la reserva ALO. En esta zona las edificaciones tienen alturas relativamente bajas.



Fotografía 41. K12+495.

Viendo hacia el sur. Estación ALO Sur. En esa zona se hace el cambio de tuneladora a "Cut and Cover".



Fotografía 42. K12+495.

Viendo al norte. Estación ALO Sur.



Fotografía 43. K14+130.

Final de la reserva ALO. En esta zona está proyectada la estación ALO Norte. La fotografía fue tomada viendo hacia el sur.



Fotografía 44. K14+130.

Final reserva ALO. Estación ALO Norte. Viendo al norte.



Fotografía 45. K14+750.

Esta fotografía muestra la tipología del corredor en la zona en la que se ha proyectado que Línea 2 sea construida con tipología semienterrada.



Fotografía 46. K15+000.

Es importante notar en esta fotografía la pendiente descendente que tiene la carretera. Es en esta zona que el trazado hace el cambio a tipología elevada. Aproximadamente en el punto desde el que se tomó la fotografía empieza la zona identificada como de amenaza media en la zonificación de amenaza por inundación.



Fotografía 47. K15+420.

Esta es la zona en la que se ha proyectado la construcción de la estación Fontanar.



Fotografía 48. K15+750.

Panorama del lote del Patio Taller.



En el recorrido a lo largo del corredor se pudo identificar una serie de puntos en los que, por las condiciones geotécnicas actuales, es necesario prestar especial atención en la formulación de los diseños de las obras subterráneas (tema analizado en los documentos asociados a las especificaciones técnicas 24 y 25) entre esos puntos están:

- Los puentes vehiculares en los que la Calle 72 cruza la Av. NQS, la Av. Carrera 68, la Av. Boyacá; el puente de la Av. Ciudad de Cali sobre la Av. Calle 80.
- Los cruces del Canal Salitre.
- Sitios de interés cultural como la plaza y la iglesia del barrio 12 de Octubre.
- Algunos edificios particularmente altos, en los que es posible la existencia de sótanos, como los ubicados en la intersección de la Calle 72 con la Carrera 24 y con la Avenida Boyacá, además de los ubicados en la primera parte del trazado.
- Algunas edificaciones de baja altura entre la Avenida Caracas y la Carrera 24 en las que aparentemente se han desarrollado asentamientos perceptibles.

La interacción de las obras propuestas para la L2MB con estos sitios será estudiada (si se encuentra necesario) según los criterios planteados para cumplir con los requerimientos establecidos para las ET24 y 25.

### 2.2.10.3 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DE REFERENCIA

El asesor ha participado en proyectos que cruzan, y en algunos casos se superponen al trazado planteado en prefactibilidad para L2MB, la exploración ejecutada en esos proyectos puede servir para complementar la descripción y zonificación planteadas en el Entregable 5.1.

Los proyectos en los que el asesor participó son los siguientes:

- Factibilidad y actualización, Complementación, Ajustes de los Estudios y Diseños, y Estudios y Diseños para la Ampliación y Extensión de la Avenida Ciudad de Cali al Sistema Transmilenio entre la Avenida Circunvalar del Sur y la Avenida Calle 170 y de los Equipamientos Urbanos Complementarios. En este informe este nombre será abreviado con la sigla TACC.
- Estudios y Diseños de la Troncal Centenario desde el Límite Occidente del Distrito hasta la Troncal Américas con Carrera 50, y de la Avenida Longitudinal de Occidente, Ramal Av. Villavicencio hasta la Av. Cali y Ramal Av. Américas hasta la Av. Cali. En este informe el nombre de este proyecto será abreviado con la sigla ALO.
- Estructuración Técnica del Tramo 1 de la Primera Línea del Metro de Bogotá.

Además de los proyectos en los que ha participado el asesor, se tuvo acceso a resultados de exploración de los siguientes estudios:

- Diseño de la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte Público SITP para la ciudad de Bogotá. Proyecto desarrollado por Consorcio L1 entre 2014 y 2015.
- Estudios y diseños de la Conexión Regional Canal Salitre y Río Negro desde el Río Bogotá hasta la NQS y la Carrera 7. Este proyecto fue desarrollado por INTEGRAL entre 2017 y 2021.
- Factibilidad, Estudios y Diseños para la adecuación al Sistema Transmilenio de la Troncal Avenida Congreso Eucarístico (Carrera 68) desde la Carrera 7 hasta la Autopista Sur y de los equipamientos urbanos complementarios, en Bogotá D.C.
- Estudio de Suelos y Recomendaciones Geotécnicas para la Factibilidad Técnica de Proyectos a cargo del Instituto de Desarrollo Urbano en la Ciudad de Bogotá. Informe de Exploración Geotécnica Sector 26 Puentes Peatonales Calle 68–Calle 72. Geotecnia & Cimentaciones S.A.S. Informe entregado el 15 de junio de 2021.



Toda la información encontrada en las campañas de exploración de estos proyectos será insumo en la Caracterización Geológica Geotécnica del corredor en la etapa de Factibilidad Técnica del Proyecto. En este documento se muestra un análisis orientado a complementar la zonificación del corredor planteada en el entregable 5.1 de la Prefactibilidad.

#### 2.2.10.3.1 Variabilidad de parámetros

Las condiciones geotécnicas del corredor pueden ser descritas, inicialmente, usando los resultados ensayos relativamente sencillos (y abundantes), como la humedad y los límites de Atterberg y se puede complementar con lo obtenido en ensayos de resistencia, como el de corte directo. En la siguiente figura se muestra una comparación de las propiedades separándolas según las zonas homogéneas definidas en prefactibilidad.

Variación de parámetros en las zonas homogéneas

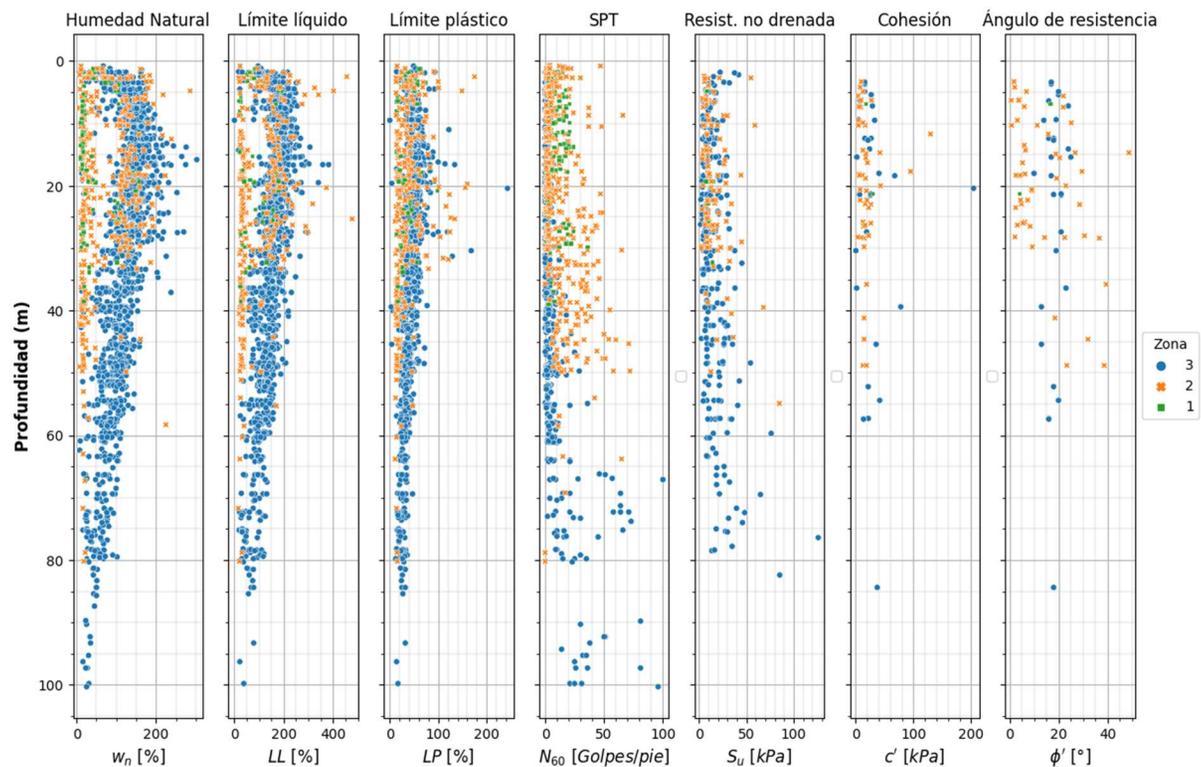


Figura 3. Variabilidad de parámetros en el corredor. El intercepto de cohesión y el ángulo de resistencia presentados fueron extraídos de ensayos de corte directo. No sobra recordar los límites de las zonas:



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

- Zona 1. Zona de la cola de maniobras, entre K0 y K0+450 del trazado de prefactibilidad. Aproximadamente entre la Carrera 5 y la Carrera 9.
- Zona 2. Corredor de la Calle 72, desde la carrera 9 hasta el cruce con la Av. Ciudad de Cali.
- Zona 3. Corredor de la Avenida Ciudad de Cali, desde la Calle 72 hasta el final del trazado en el Patio Taller.

Los resultados presentados en la figura anterior muestran que la zonificación planteada en el entregable 5.1 logra separar de forma relativamente clara entre dos tipos de materiales: en la Zona 3 los materiales tienen una humedad más alta que en el resto del corredor y también, en los SPT, muestran una menor resistencia a la penetración. Esta afirmación necesita una aclaración, y es que la mayor cantidad de la información de referencia usada para generar la figura está localizada en la Zona 3.

Los resultados de los ensayos de corte directo (presentados en las columnas de la derecha de la figura) muestran una dispersión relativamente alta en los ángulos de resistencia obtenidos para muestras de la zona 2, esto se debe revisar en fases posteriores del proyecto pero puede estar relacionado con la presencia de lentes de materiales limo-arenosos a lo largo de esa parte del corredor.

A continuación se muestra la representación de los resultados zona por zona, esto para dar una idea más clara de, por un lado, la cantidad de información disponible en cada sector y por otro lado, de las tendencias que siguen los parámetros.



Variación de parámetros en la Zona 1 definida en la Prefactibilidad

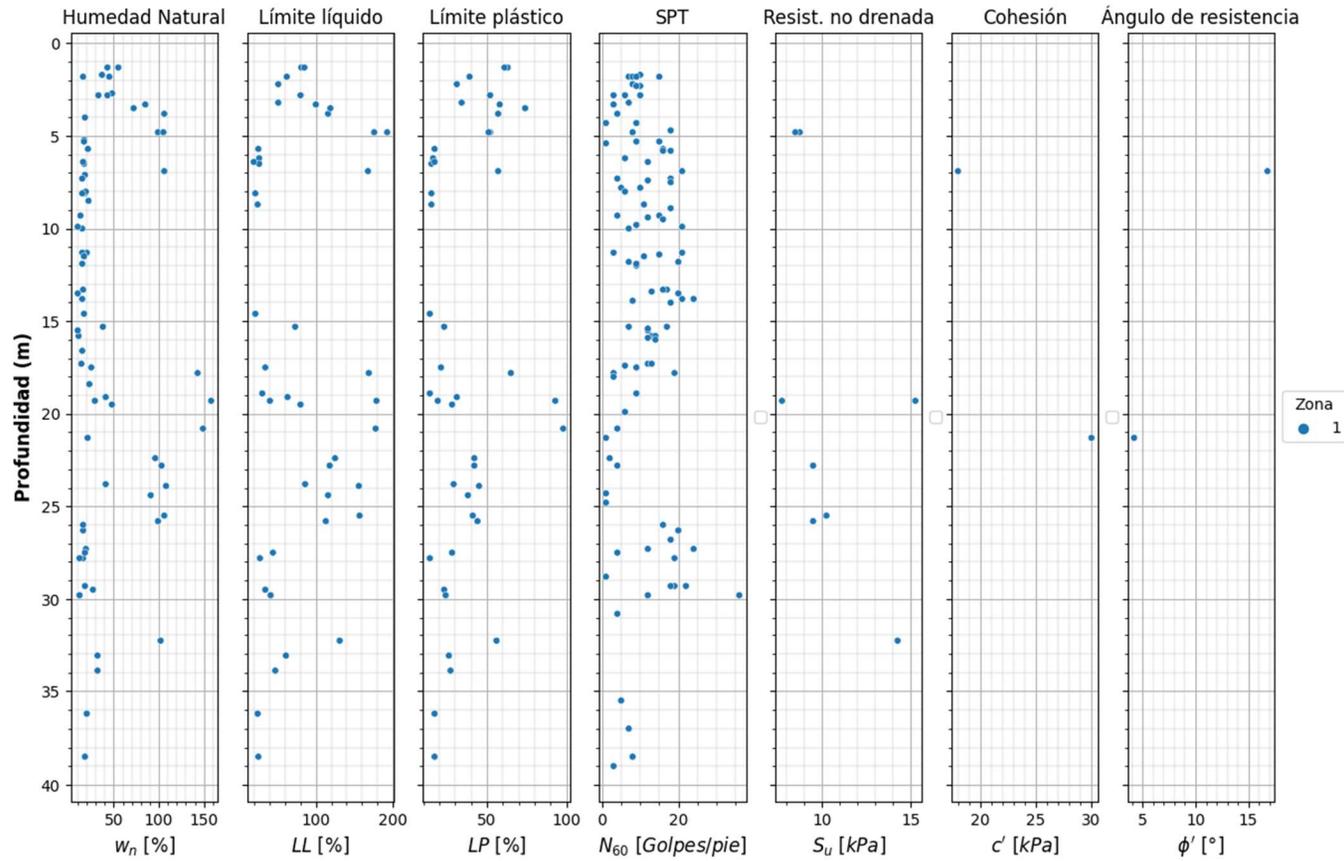


Figura 4. Variabilidad de parámetros en el corredor.



Variación de parámetros en la Zona 2 definida en la Prefactibilidad

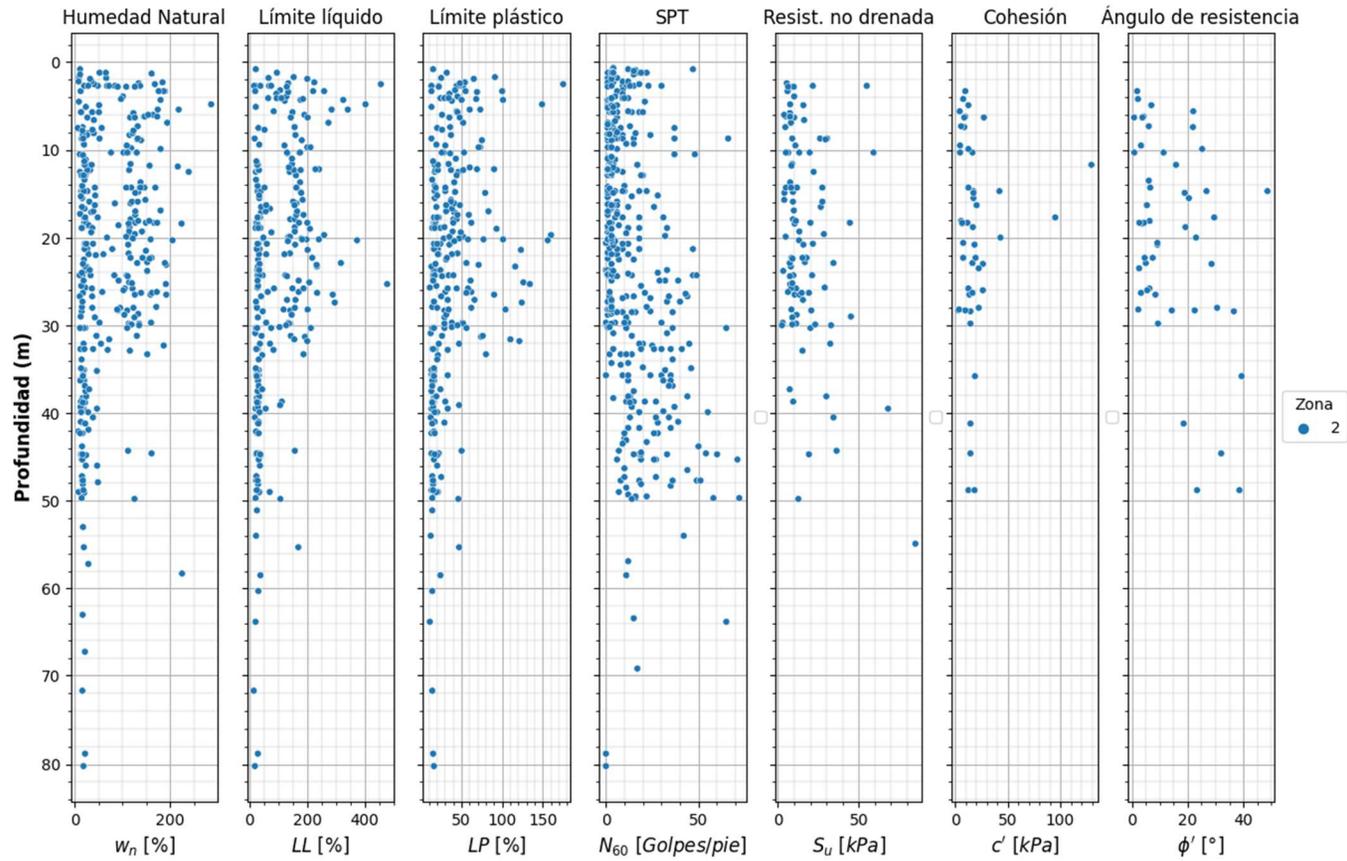


Figura 5. Variabilidad de parámetros en el corredor.



Variación de parámetros en la Zona 3 definida en la Prefactibilidad

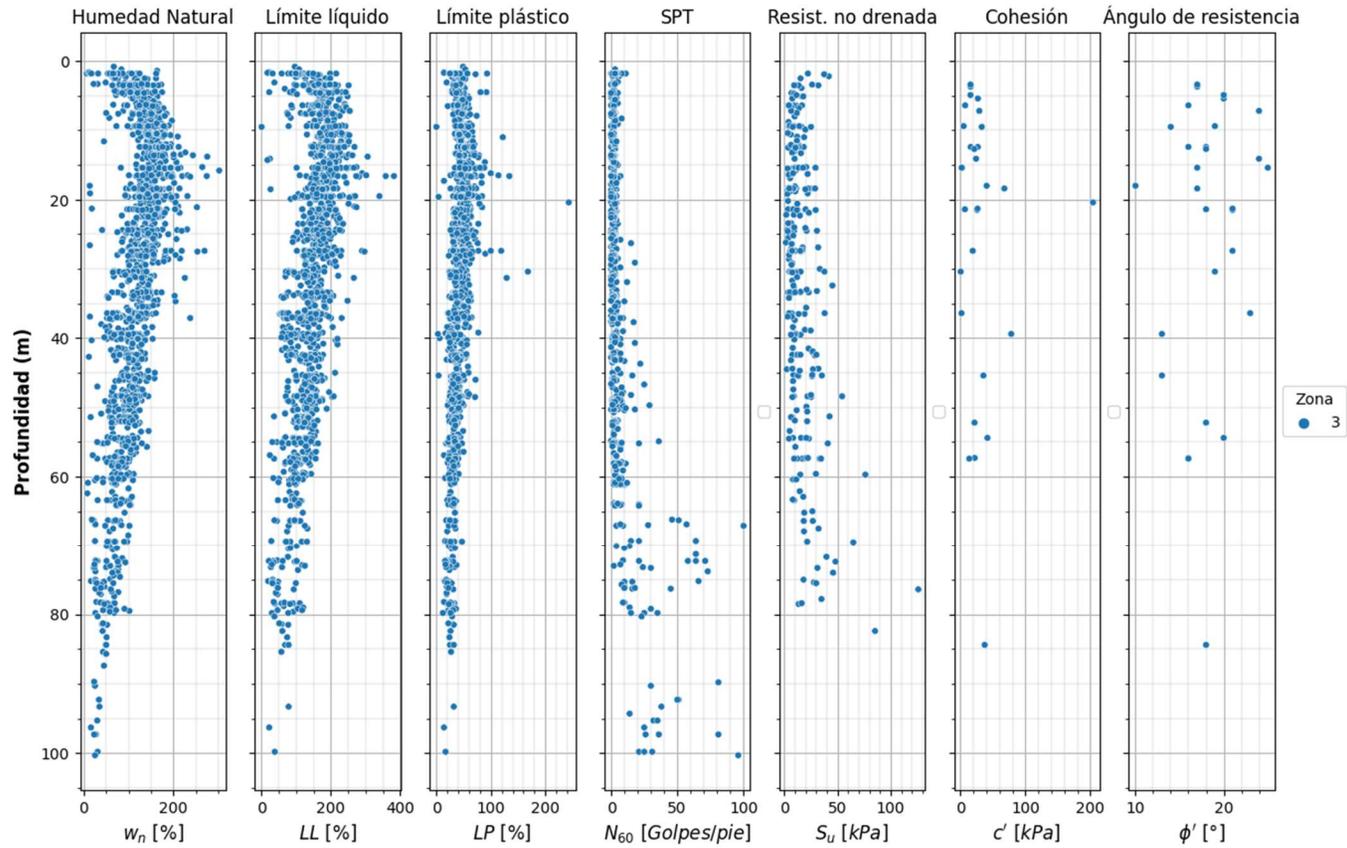


Figura 6. Variabilidad de parámetros en el corredor.



Ahora, en la experiencia del asesor la humedad natural de los materiales es una medida que muestra una buena correlación con otras propiedades, esto se muestra a continuación para los Límites Líquido y Plástico y para el índice de compresibilidad. Se aprovecha la relación entre la humedad natural y otros parámetros para validar, y refinar en la caracterización para la Factibilidad Técnica, la zonificación propuesta en el entregable 5.1.

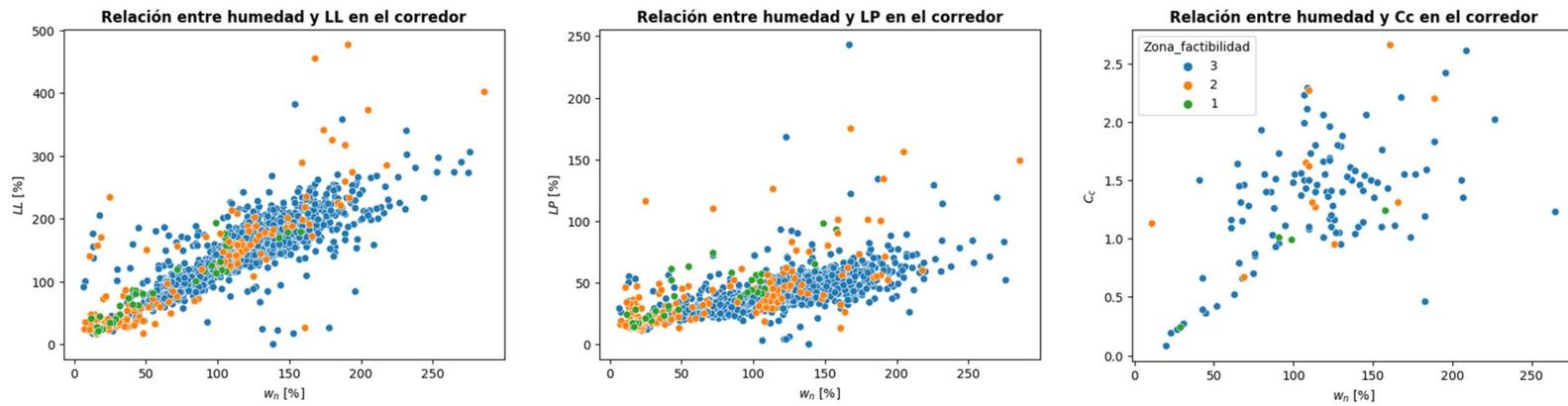


Figura 7. Relación entre la humedad natural, los límites de Atterberg y el índice de compresibilidad de los materiales en el corredor de L2MB.

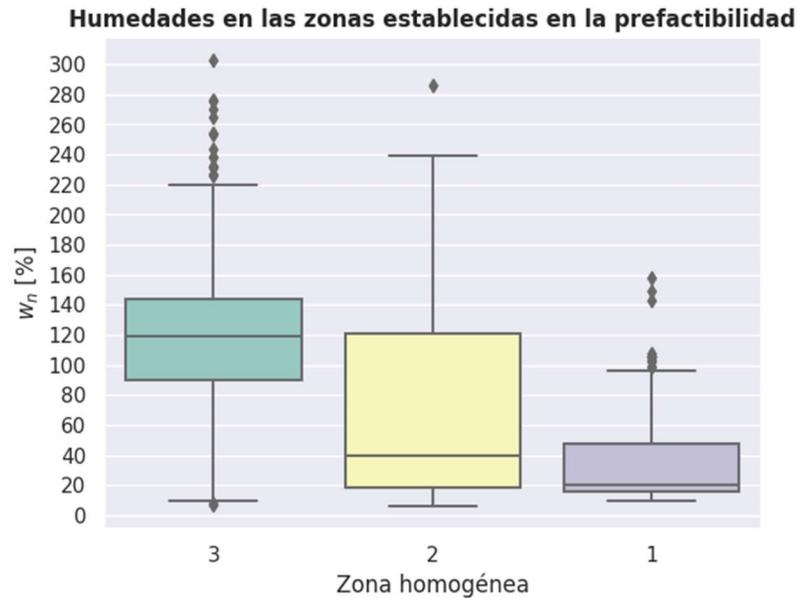


Figura 8. Variación de la humedad natural en las zonas homogéneas.

La figura anterior muestra la variación de la humedad natural en cada una de las zonas homogéneas y, de nuevo, se puede observar que hay claras diferencias entre cada una de las zonas; hay, sin embargo, el rango intercuartílico en la Zona 2 es relativamente amplio, se puede explorar el origen de esta amplitud incluyendo un criterio adicional que sirva en la zonificación del corredor, se decide incluir la información que aportan las Zonas de respuesta sísmica de la Microzonificación Sísmica de Bogotá, y se obtiene la siguiente distribución:

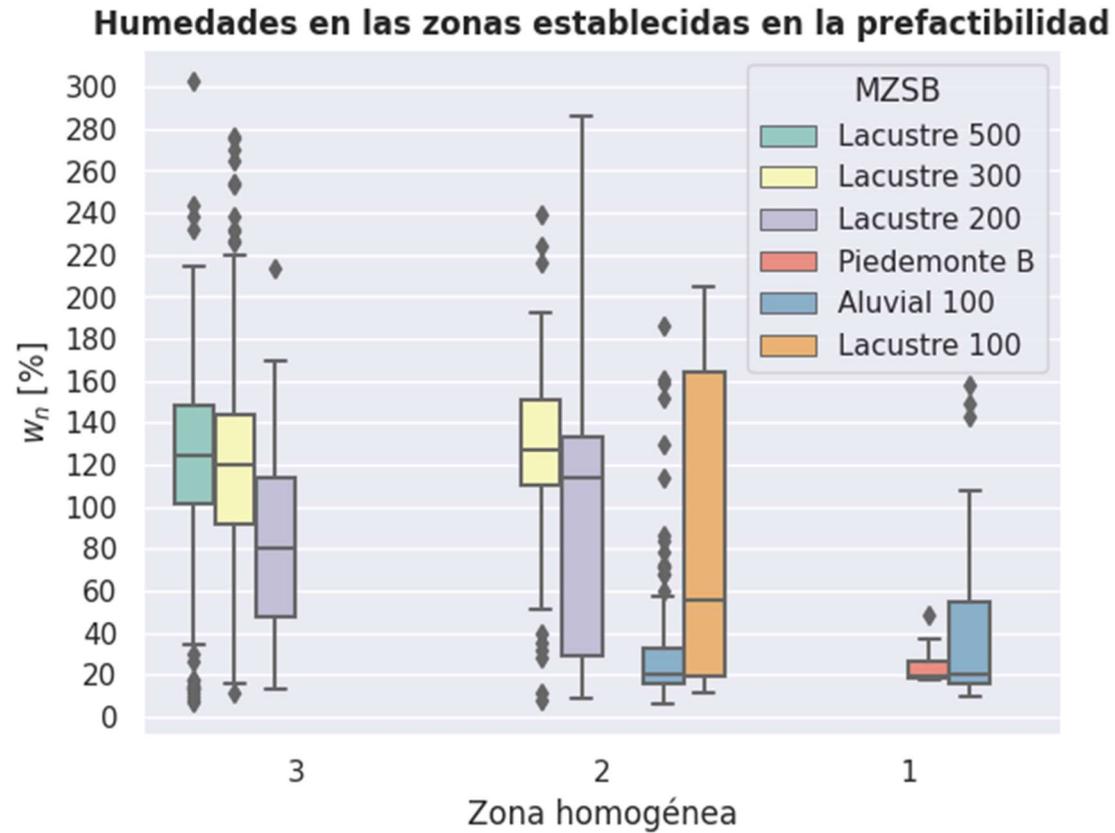


Figura 9. Variación de la humedad natural en las zonas homogéneas, separando según la zona de respuesta sísmica establecida en la MZSB.

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

Las figuras mostradas sugieren que la zonificación del corredor en etapas posteriores del proyecto puede ser modificada ligeramente, moviendo la frontera entre la zona 2 y la zona 3 un poco al occidente hasta la Avenida Caracas (en la zonificación actual está a la altura de la carrera 9) pues en esa intersección está la frontera entre las unidades Aluvial 100 y Lacustre 200 (como lo muestra el [Anexo 1](#)).

Un análisis más detallado de la variabilidad de los parámetros será presentado en fases posteriores del proyecto, con la información de referencia se logró:

- Validar y refinar la zonificación geotécnica del corredor.
- Identificar tendencias de comportamiento y relaciones entre relaciones índice de los materiales.
- Identificar tendencias en los parámetros de resistencia de los materiales: en general se tiene que los materiales de las zonas 2 y 3 son blandos. Un análisis más detallado incluyendo parámetros efectivos de resistencia no muestra tendencias claras.
- Identificar un vacío en la información disponible: no suficientes datos de permeabilidad para caracterizar en ese aspecto los materiales del corredor.

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

### 2.2.10.4.1 Línea 1 elevada (en construcción)

#### 2.2.10.4.1.1 Deprimido en la intersección entre la Av Caracas y la Calle 72

De los diseños de la Primera Línea que actualmente está en construcción es relevante el diseño del deprimido en la intersección entre la Av. Caracas y la Calle 72<sup>4</sup>. En esta zona el viaducto de la Primera Línea del Metro está proyectado en el separador de la Av. Caracas y se planteó que mientras la Avenida mantiene su nivel, la Calle 72 atraviesa la intersección por debajo. Este paso deprimido, en su concepción preliminar, tiene una longitud aproximada de 295 m, y desde el componente estructural se ha planteado que sea construido usando un sistema de pantallas preexcavadas con un apuntalamiento superior que permita garantizar un gálibo mínimo de 5,5 m.

Esta estructura es relevante por dos razones: (1) se superpone al trazado de la Línea 2 del Metro de Bogotá y (2) da luces de las propiedades y particularidades del material en la zona –en esta zona, según el mapa de Zonas Geotécnicas de la MZSB, se espera encontrar la transición entre material aluvial y lacustre–.



Para no hacer muy extensa esta sección se propone un resumen de los puntos principales de los criterios de diseño adoptados para esa estructura, seguido de una descripción general de la estratigrafía de diseño cerrando la sección con un los aspectos principales del diseño geotécnico propuesto:

#### Criterios de diseño:

- En términos de longitud de empotramiento se establece que como mínimo debe ser una que garantice el equilibrio de la pantalla, es decir, una longitud que permita garantizar que la sumatoria de empujes y momentos sea 0.
- Para la evaluación de la estabilidad global y local se debe cumplir con el valor mínimo para los Factores de Seguridad establecido en la Tabla H.2.4.1 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10:

Tabla 1. Factores de seguridad mínimos para la evaluación de estabilidad de taludes. Fuente NSR-10.

<sup>4</sup> Esta información se encuentra en el documento L1T1-2430-541-CON-ED-GEO-IN-0001\_V00\_Informe.pdf

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

<b>Criterio</b>	<b>Valor</b>
<b>Taludes – Condición Estática y Agua Subterránea Normal</b>	1.50
<b>Taludes – Condición Pseudoestática con Agua Subterránea Normal</b>	1.05
<b>Taludes en construcción - Condición Estática y Agua Subterránea Normal</b>	1.25
<b>Taludes en construcción - Condición Pseudoestática y Agua Subterránea Normal</b>	1.00

- La definición de los desplazamientos horizontales máximos permisibles se hace en función de lo planteado en la Tabla H.6.4.1 de la NSR-10, el criterio establecido en el Código está en función de la altura libre de la pantalla y se hace una distinción entre cuatro tipos de materiales, como se muestra a continuación. El objetivo es prevenir el desarrollo de la condición activa, y en esa medida se debe usar esa columna de la tabla.

Tabla 2. Desplazamientos máximos admisibles. Fuente: NSR-10.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Estado activo</b>	<b>Estado pasivo</b>
<b>Granular denso</b>	0.001 H	0.020 H
<b>Granular suelto</b>	0.004 H	0.060 H
<b>Cohesivo firme</b>	0.010 H	0.020 H
<b>Cohesivo blando</b>	0.020 H	0.040 H

- En términos de asentamientos, se establece la necesidad de verificar los asentamientos diferenciales entre las pantallas, esto para evitar daños en las estructuras del deprimido. No hay un valor máximo establecido para este chequeo pues debe ser establecido por especialistas estructurales.
- Teniendo en cuenta que para lograr que el empuje pasivo se desarrolle en su totalidad es necesario un desplazamiento de gran magnitud, para efectos de cálculos se le reduce, dividiéndolo a la mitad.
- Se propone calcular el ángulo de interacción  $\delta'$  –que da la inclinación entre una línea normal a la cara del muro y el empuje (activo o pasivo) resultante– como  $\frac{2}{3}\phi'$ .
- Para tener en cuenta los efectos sismo de diseño (definido como “un sismo cuyos efectos en el lugar de interés tienen una probabilidad de sólo diez por ciento de ser excedidos en un lapso de 50 años, lo que conduce a un periodo de retorno de 475 años”) se propone usar la metodología de análisis pseudoestático de

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

Mononobe-Okabe. Para la determinación de los coeficientes de aceleración que requiere el análisis seudoestático proponen  $A_h=A_o$  y  $A_v=1/2 A_h$ . Siendo  $A_o$  la aceleración pico efectiva del terreno en superficie.

### **Estratigrafía:**

Como se mencionó anteriormente, en esta zona del trazado se espera encontrar<sup>5</sup> la transición entre las unidades Aluvial-100 y Lacustre-200, eso fue lo que efectivamente se encontró en el proceso de exploración del suelo, en el que:

- En la litología de 5 perforaciones se encontró predominancia de arcillas limosas, arenas arcillosas y capas de arenas; lo que se ajusta con lo esperado en la unidad Aluvial.
- Y en cambio, en dos perforaciones se encontró presencia de arcillas limosas, arenas arcillosas y lentes de turba y material orgánico; litología que se ajusta a lo esperado en la unidad Lacustre.

Para los parámetros de diseño de la estructura el consultor presentó dos perfiles típicos, uno para la unidad Lacustre y otro para la Aluvial, como se muestra en las siguientes tablas:

---

<sup>5</sup> Según el mapa de Zonas Geotécnicas de la Microzonificación Sísmica de Bogotá..

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

Tabla 3. Perfil estratigráfico y parámetros geotécnicos de diseño para el paso deprimido de la Av. Caracas en el proyecto L1MB en construcción. Fuente: Metro Línea 1,

<b>Material</b>	<b>USCS</b>	$\gamma_t$ <b>kN/m<sup>3</sup></b>	<b>Cu</b> <b>kN/m<sup>2</sup></b>	$\phi'$	<b>C'</b> <b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>E</b> <b>kN/m<sup>2</sup></b>	<b>K</b> <b>m/s</b>	<b>e<sub>o</sub></b>	<b>Cc</b>	<b>Cr</b>
<b>1. Relleno compuesto por arcilla arenosa con presencia de gravas</b>	GC	16.5	-	34	1.0	5732	5.65e-10	-	-	-
<b>2. Arcilla limosa con contenido de materia orgánico</b>	CH	12.3	21.1	20	13.1	5370	3.35e-11	4.090	2.202	0.071
<b>3. Arcilla limosa de consistencia blanda</b>	CH	13.4	21.6	17	19.2	5500	2.81e-11	2.090	1.268	0.093
<b>4. Arcilla limosa con contenido de materia orgánico</b>	CH	13.1	14.8	20	13.1	3761	1.96e-11	3.070	1.305	0.084
<b>5. Arcilla limosa de consistencia blanda</b>	CH	13.4	22.3	22	17.5	5694	2.81e-11	2.090	1.268	0.093

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

Tabla 27 - Perfil estratigráfico – Análisis geotécnicos – zona lacustre

Material	Profundidad (m)		Espesor (m)
	De	A	
<b>1. Relleno compuesto por arcilla arenosa con presencia de gravas</b>	0.0	2.5	2.5
<b>2. Arcilla limosa con contenido de materia orgánico</b>	2.5	7.0	4.5
<b>3. Arcilla limosa de consistencia blanda</b>	7.0	18.0	11.0
<b>4. Arcilla limosa con contenido de materia orgánico</b>	18.0	23.0	5.0
<b>5. Arcilla limosa de consistencia blanda</b>	23.0	-	-

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

Material	USCS	$\gamma_t$ kN/m <sup>3</sup>	Cu kN/m <sup>2</sup>	$\phi'$	C' kN/m <sup>2</sup>	E kN/m <sup>2</sup>	K m/s	e <sub>o</sub>	Cc	Cr
<b>1. Relleno compuesto por arcilla arenosa con presencia de gravas</b>	GM	16.5	-	34	1.0	5732	5.69e-10	-	-	-
<b>2. Arcilla limosa con contenido de materia orgánico</b>	CH	14.5	17.8	20	13.7	4526	3.35e-11	4.090	2.202	0.071
<b>3. Arena arcillosa de grano medio a fino con presencia de gravas</b>	SM	19.5	-	30	4.2	8250	1.74e-6	-	-	-
<b>4. Arcilla limosa de consistencia blanda</b>	CH	13.2	23.7	20	16.9	6033	2.81e-11	2.378	0.870	0.085
<b>5. Arena arcillosa de grano medio a fino con presencia de gravas</b>	SM	18.6	-	27	0.8	9500	5.63e-7	-	-	-
<b>6. Arcilla limosa de consistencia blanda a firme</b>	SC	18.3	28.5	19	39.4	7268	2.10e-11	1.300	0.666	0.101
<b>7. Arena arcillosa de grano fino con presencia de gravas</b>	CH	17.3	-	25	0.3	6500	5.63e-7	-	-	-
<b>8*. Arcilla limosa de consistencia blanda a media</b>	CH	14.6	17.3	19	16.8	4399	2.81e-11	1.300	0.666	0.101

**Tabla 28 - Perfil estratigráfico – Análisis geotécnicos – zona aluvial**

Material	Profundidad (m)		Espesor (m)
	De	A	
<b>1. Relleno compuesto por arcilla arenosa con presencia de gravas</b>	0.0	2.0	2.0
<b>2. Arcilla limosa con contenido de materia orgánico</b>	2.0	5.5	3.5
<b>3. Arena arcillosa de grano medio a fino con presencia de gravas</b>	5.5	17.5	12.0
<b>4. Arcilla limosa de consistencia blanda</b>	17.5	27.0	9.5
<b>5. Arena arcillosa de grano medio a fino con presencia de gravas</b>	27.0	29.5	2.5
<b>6. Arcilla limosa de consistencia blanda a firme</b>	29.5	35.7	6.2
<b>7. Arena arcillosa de grano fino con presencia de gravas</b>	35.7	-	-

El estudio presenta también un análisis de *suelos con condiciones especiales*, los principales hallazgos de este análisis son:

- Los materiales granulares encontrados en la zona no son susceptibles a procesos de licuación.
- Se hizo una evaluación de la expansividad de los materiales finos usando ensayos de expansión libre (método C) en los que se encontró que los suelos redujeron su altura durante el ensayo. Este análisis se complementa con la determinación del potencial de cambio volumétrico con el aparato de Lambe, en el que se obtuvo una condición de suelo no crítico, es decir, el potencial de expansión es bajo a nulo.

**Diseño geotécnico:** el diseño geotécnico presentado en el documento se puede dividir en dos partes, por un lado, entregan un dimensionamiento de las pantallas, y por el otro lado, complementan el diseño con un programa de instrumentación y monitoreo. A continuación se presenta un resumen de esos componentes:

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

El dimensionamiento de las pantallas, fue validado chequeando su estabilidad global, su FS por falla de fondo, y estudiando la interacción suelo estructura con elementos finitos. El resultado obtenido se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4. Dimensionamiento de las pantallas para el paso deprimido de la Calle 72 bajo la Av. Caracas. Fuente: Metro Línea 1, 2021.

Tabla 50 - Dimensionamiento inicial de las pantallas

Zona	Altura libre (m)	Longitud total (m)	Longitud empotramiento (m)	¿Apuntalamiento superior?
<b>Occidental (Lacustre)</b>	2.0	5.5	3.5	No
	3.0	8.0	5.0	No
	4.0	10.5	6.5	No
	5.0	13.5	8.5	No
	6.0	16.0	10.0	No
<b>Central (Lacustre)</b>	7.0	14.0	7.0	Si
<b>Oriental (Aluvial)</b>	2.0	4.0	2.0	No
	3.0	6.0	3.0	No
	4.0	8.0	4.0	No
	5.0	10.0	5.0	No
	6.0	13.0	7.0	No

Instrumentación:

El consultor recomienda la instalación de instrumentación que permita monitorear presiones de poros y deformaciones de pantallas y puntales durante la construcción y operación de la estructura.

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

- Para medir presiones de poros se recomienda la instalación de 5 piezómetros de hilo vibrátil, con longitud de 30 m (no indican la cantidad de sensores) que deben ser leídos dos veces a la semana durante la construcción y una vez a la semana durante la operación de la estructura. Las lecturas deben iniciar, al menos, dos semanas antes del inicio de la construcción.
- Para monitorear deformaciones y esfuerzos sobre las pantallas se plantea la instalación de:
  - 2 inclinómetros que permitan cuantificar las deformaciones horizontales. La frecuencia e inicio de lecturas de estos instrumentos son iguales a las planteadas para los piezómetros.
  - Control topográfico con estación total y nivel de precisión. La frecuencia e inicio de lecturas de estos instrumentos son iguales a las planteadas para los piezómetros.
  - 10 medidores de deformación unitaria que deben ser instalados una vez finalizada la construcción de las pantallas y los puntales. Deben ser leídos dos veces por semana durante la etapa de construcción y una vez por semana durante la operación.

#### 2.2.10.4.1.2 Cimentaciones profundas

Los estudios de factibilidad de la Primera línea del Metro de Bogotá, plantearon la construcción de una línea elevada con una longitud aproximada de 20 km, la cual inicia el Patio Taller ubicado en el predio El Corzo, en cercanías del río Bogotá al occidente del Portal Américas, y finaliza sobre la Avenida Caracas a la altura de la Calle 76. La solución de cimentación para el viaducto consiste en pilotes pre-excavados y fundidos in-situ. De acuerdo con los estudios de factibilidad, el proyecto requiere la construcción de aproximadamente 270.000 ml de pilotes con diámetros entre 1,2 y 2,0 m. En la Figura 3 se presenta el alineamiento general del proyecto.

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

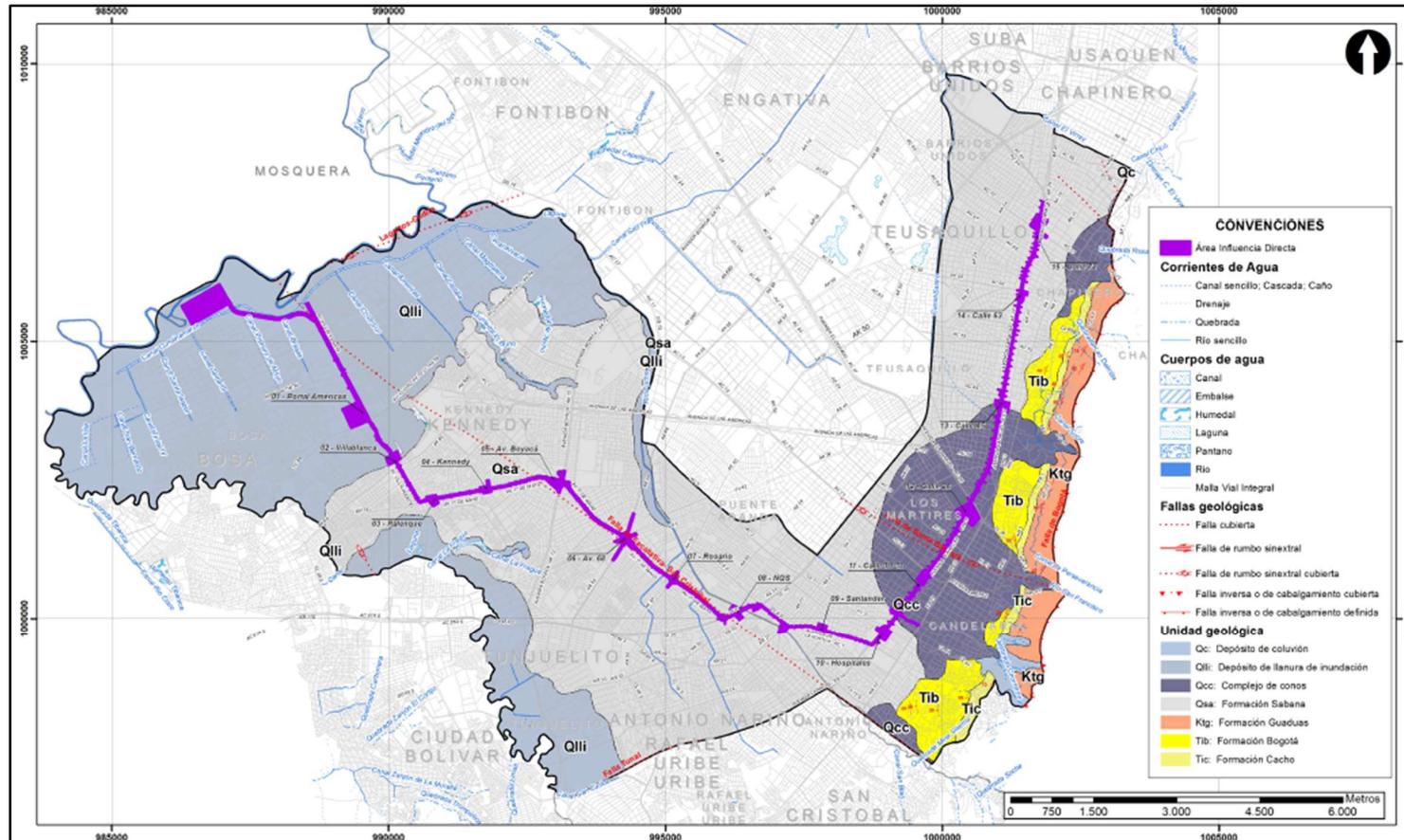


Figura 10. Planta geológica y alineamiento de la PLMB  
Fuente: Consorcio METRO BOG, 2018.

Con el propósito de validar la capacidad de carga estimada en los estudios de factibilidad, se planteó la ejecución de nueve (9) pruebas sobre pilotes de sacrificio a escala real distribuidos a lo largo del corredor. En estos pilotes se instalaron elementos hidráulicos (celdas Osterberg) para inducir la falla de la interfaz suelo - pilote y de esta manera registrar resistencia movilizada a lo largo del fuste y en la punta mediante la instrumentación de las deformaciones inducidas en el pilote. En la Tabla 5 y la Figura 4 se presenta la ubicación de las pruebas.

Tabla 1. Localización de las pruebas de carga.

Prueba No.	Ubicación aproximada	Coordenadas		Pilote de prueba	
		N	E	Longitud (m)	Diámetro (m)
1	Avenida Caracas entre Calles 71 y 77	101 782,46	107 440,93	68,50	1,80
2	Avenida Caracas entre Calles 71 y 64	101 639,00	106 432,00	51,30	1,80
3	Avenida Caracas entre Calle 13 y Calle 31	100 416,57	101 853,70	55,00	1,20
4	Avenida Primero de Mayo con NQS y Calle 8 sur con Carrera 28	97 150,85	99 897,85	65,00	1,60
5	Calle 26 sur entre Carrera 51 y Carrera 41 bis	95 113,23	100 696,57	67,00	1,60
6	Avenida Primero de Mayo entre Carrera 73 y Carrera 68h	94 338,54	101 434,58	65,00	1,80
7	Avenida Villavicencio entre Carrera 80d y Carrera 78h	90 816,00	102 102,00	69,50	1,60
8	Avenida Villavicencio entre Carrera 90 y la Avenida Ciudad de Cali	89 267,00	103 726,00	69,50	1,60
9	Avenida Villavicencio entre Carrera 97B y Canal Cundinamarca	87 205,00	105 539,00	72,50	2,00

Fuente: Consorcio METRO BOG, 2018.

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

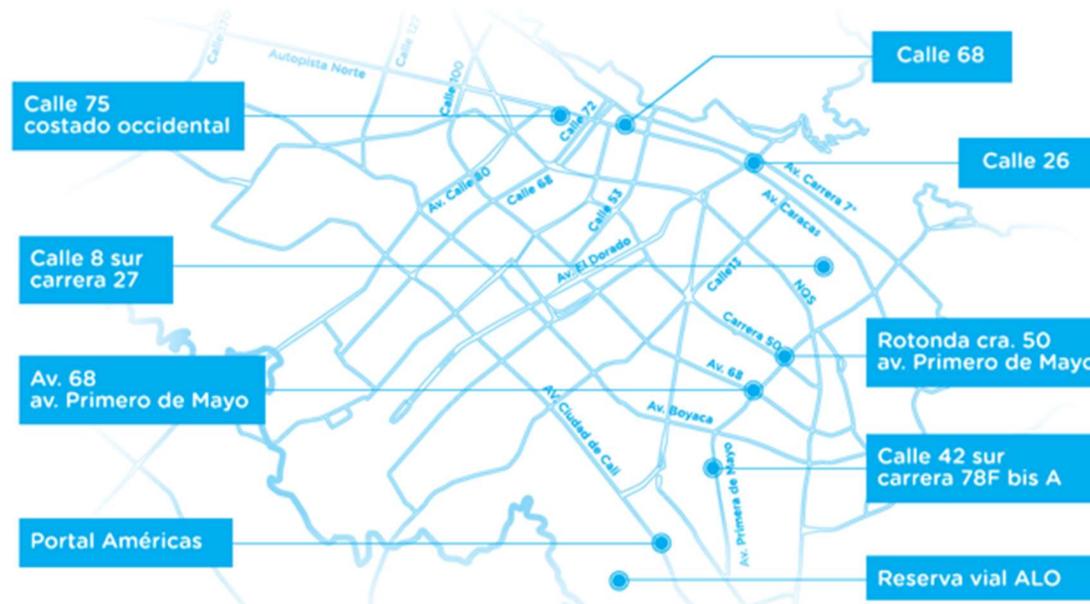


Figura 11. Localización pruebas de carga.  
Fuente: Consorcio METRO BOG, 2018.

Como resultado del análisis de las mediciones realizadas y de los resultados de la caracterización de los materiales encontrados en cada sitio de prueba, se estableció la relación entre la resistencia no drenada ( $S_u$ ) y la fricción desarrollada en la interfaz suelo - pilote ( $f_s$ ), lo que permitió establecer una tendencia del factor de adhesión ( $\alpha$ ) característica de los suelos de la ciudad. La relación antes descrita se presenta en la Figura 5, en la cual se compara con las expresiones planteadas en la NSR-10 y en el CCP-14.

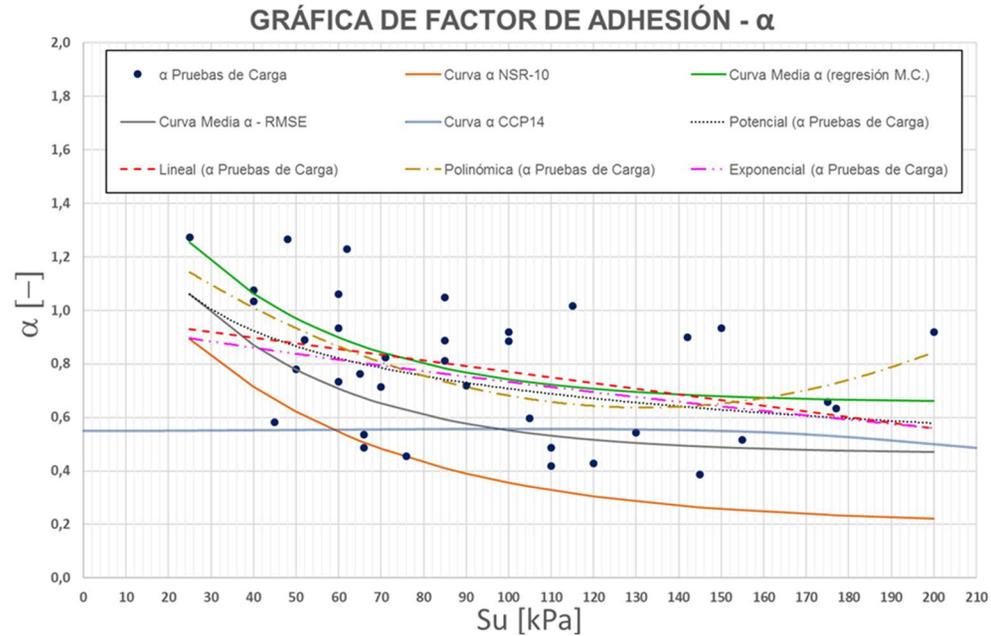


Figura 12. Curvas de factor de adhesión - alfa

Fuente: Consorcio METRO BOG, 2019.

A partir de los resultados obtenidos, se llevó a cabo una evaluación de las longitudes de pilotes inicialmente estimadas y se logró una optimización del orden del 11%. Esta información, además de relevante para el proyecto PLMB y la ciudad, resulta valiosa para las estimaciones de capacidad de carga de pilotes que se realizarán para los tramos elevados del proyecto L2MB.

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

#### 2.2.10.4.2 Línea 1 subterránea (2014)

Si bien la Línea 1 del Metro en el proyecto planteado en 2014 fue descartada, su trazado cruza con el de la Línea 2 estudiada en este documento y hay semejanzas entre los proyectos y su análisis puede aportar información valiosa. En primer lugar se muestra, en la siguiente imagen, el trazado de esa línea (para facilitar la interpretación: sale del Patio Taller en Bosa, llega al Portal de las Américas, toma la Av. Primero de Mayo hasta cruzar la Av. Carrera 30, continúa al oriente por la Av. Fucha y la Av. Calle 1 para finalmente llegar a la Av Caracas, en donde gira al norte, dirección que mantiene transitando por las Carreras 10, 13 y 11 ).



Figura 13. Localización y trazado proyecto PLMB 2014 - metro subterráneo.

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

Fuente: Memoria. Resúmenes Ejecutivos. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (00-202006-DF-MEM-RESEJEC-PRES-01-VF)

Para esta línea se había proyectado:

- 27 estaciones, todas subterráneas. Con tres tipologías, todas proyectadas para ser construidas con sistemas de pantallas preexcavadas en los que se propuso el uso de la metodología “Cut and Cover” Inversa, que se explica y se ilustra en el apartado de este documento dedicado al análisis de la ET-25.
- 1 Patio Taller. En la localidad de Bosa, a orillas del río Bogotá.
- 1 ramal técnico. Que transita superficialmente.
- 25,2 km de línea subterránea. La construcción de ésta, con las secciones que se ilustran a continuación, se planteó así:
  - Entre el Portal de Las Américas y la Estación Gran Colombia: tuneladora tipo EPB.
  - Entre la estación Gran Colombia (aproximadamente a la altura de la calle 38) y la estación Calle 127: entre pantallas.

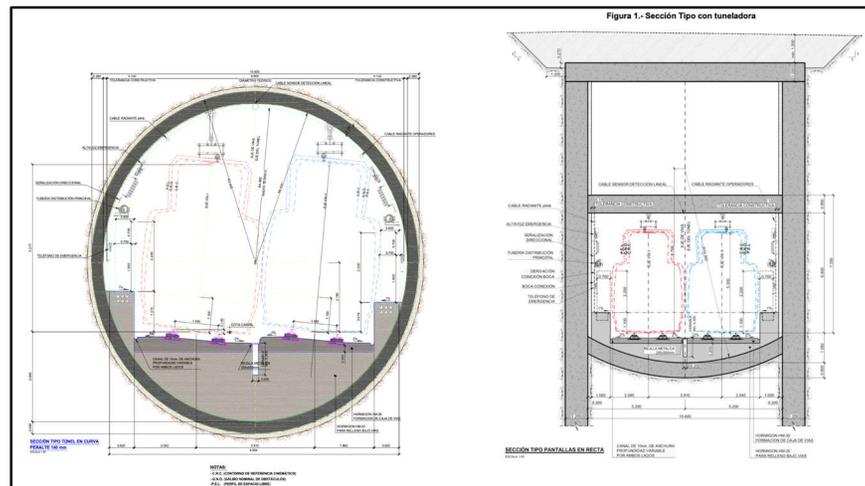


Figura 4. Secciones del túnel en el proyecto PLMB 2014. A la izquierda la sección con tuneladora EPB y a la derecha con pantallas preexcavadas.

Fuente: Proyecto de Túneles y Obras Subterráneas. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (202006-DF-PR04-ANX14-MEM-03-VF)

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

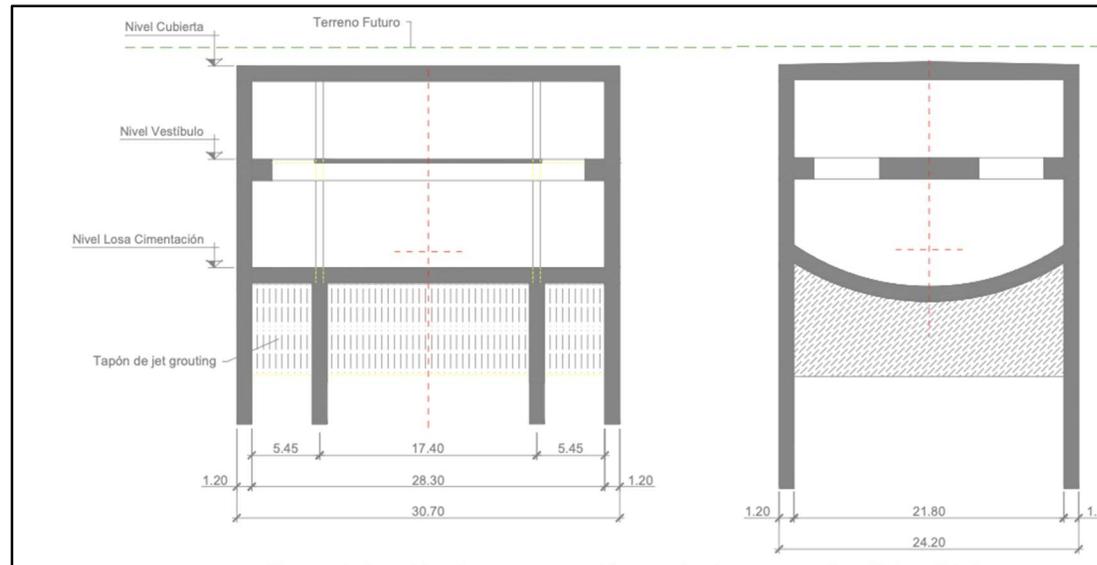


Figura 14. Secciones típicas de estaciones en el proyecto PLMB 2014. A la izquierda la sección estaciones T1p y a la derecha estaciones T2p.

Fuente: Proyecto de Túneles y Obras Subterráneas. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (202006-DF-PR03-DOC-01-VF)

Enmarcando el análisis del Estudio de 2015 de la Primera Línea del Metro en el alcance propuesto para la ET-10, se destaca la siguiente información:

- Análisis geotécnico de las estaciones:
  - Un punto particular del diseño es que fue desarrollado con la versión anterior (95) del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes.
- Recomendaciones constructivas para las estaciones:
  - Como se mencionó anteriormente, se proyectó que todas las estaciones fueran construidas con el sistema “Cut and Cover” con pantallas preexcavadas.
  - Las recomendaciones y observaciones puntuales que emite el informe (202006-DF-PR03-DOC-01-VF) se resumen a continuación:
    - El apuntalamiento de los muros se resuelve mediante las losas de vestíbulos, con puntales metálicos provisionales, con un tapón de Jet-Grouting (que se puede ver en la figura anterior) y con la contrabóveda.
    - Para manejar el nivel freático, apuntando a desarrollar la excavación en seco plantean dos alternativas: (1) empotrar las pantallas en un nivel impermeable que garantice que el flujo hacia el interior del recinto sea reducido y (2) realizar un tratamiento de impermeabilización al fondo de



- la excavación, antes de empezarla. Otras opciones que involucren drenaje, se descartan a priori, por los efectos de depresión del nivel freático y los asentamientos que ese proceso puede causar.
- Proponen un tratamiento continuo del fondo de las excavaciones con Jet-Grouting (con espesor mínimo de 4,0 m), para cumplir dos objetivos: (1) que funcione como puntal provisional y (2) que elimine la posibilidad de fallas de fondo.
  - Para cada estación reportan haber realizado un análisis para determinar si las pantallas quedan empotradas en suelos que puedan ser considerados impermeables, o si es necesario que el tapón de Jet-Grouting cumpla la función de impermeabilización.
  - Los análisis geotécnicos desarrollados en cada estación son los siguientes:
    - Capacidad portante de las pantallas y pilas intermedias, para cargas verticales.
    - Comprobación de la capacidad portante del conjunto de la estación, considerando que actúa como una cimentación compensada con losa.
    - Asentamientos del conjunto de la estación.
    - Análisis de flotación para garantizar que no se produzca levantamiento de la estructura por el empuje hidrostático del agua.
    - Comprobación estructural del tapón de Jet-Grouting a flexión y su capacidad a esfuerzo cortante.
    - Hay un documento dedicado a la metodología para la evaluación de la afectación a los edificios circundantes: “02006-DF-PR04-DOC-10-VF. Bases de diseño de túneles. Afecciones a los edificios.”
    - El espesor planteado para las pantallas preexcavadas es 1,20 m.
  - Una de las estaciones de ese proyecto se ubica en la Carrera 11 con Calle 72, es decir, se cruza con el trazado propuesto para la Línea 2, del análisis presentado (en el documento 202006-DF-PR03-DOC-10-VF) para ese sitio vale la pena destacar:
    - La descripción geotécnica del perfil: *“Bajo un nivel de rellenos antrópicos de entre 1 y 2 m de espesor, se observan los materiales correspondientes al complejo de conos. Se presentan como intercalaciones caóticas de suelos cohesivos y arenosos, sin continuidad lateral y sin que pueda establecerse un incremento de la resistencia en profundidad”.*
    - Dicen más adelante: *“La existencia de niveles de materia orgánica, de hasta 4 m de espesor, detectados tanto en forma de niveles con cierta continuidad, como a modo de lentejones, especialmente en la primera parte de la estación”.* Cuando hablan de la parte inicial de la estación se refieren a la parte sur de la estación que coincide, aproximadamente, con la Av. Calle 72. El perfil considerado para esta parte de la estación se muestra en la siguiente figura.
    - La profundidad de empotramiento de las pantallas propuestas en esta estación es de 1,0 m bajo el tapón de Jet-Grouting (de 5,50 m de espesor medidos desde el nivel mínimo de la losa de fondo aproximadamente 21,5 m de profundidad), lo que se traduce en pantallas con la longitud de 25 m, medidos desde la cara inferior de la losa de cubierta, y apoyadas a 27,70 m de profundidad.

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

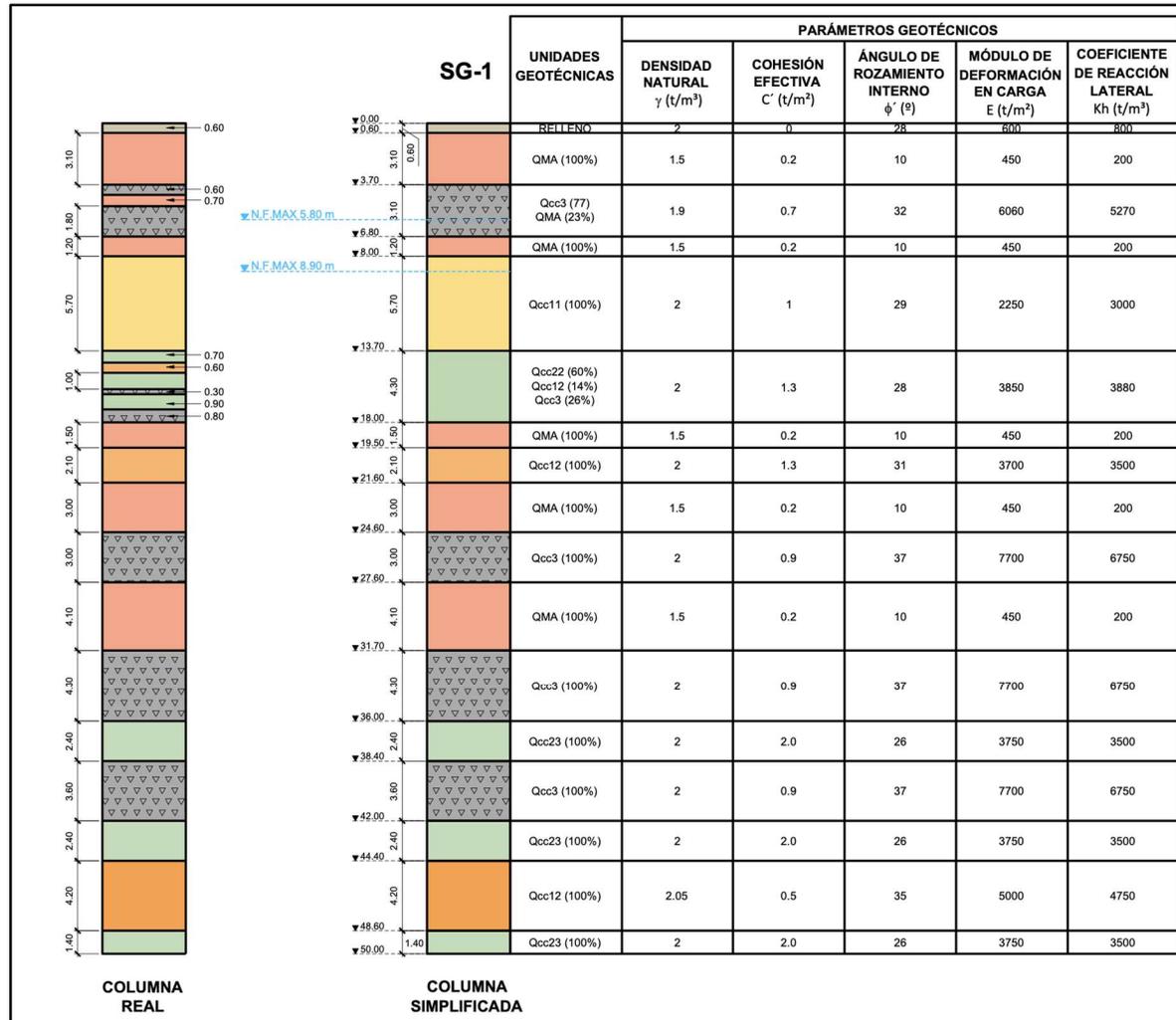


Figura 6. Columna estratigráfica y parámetros geotécnicos de diseño para la estación Avenida Chile en el proyecto PLMB, 2014.

Fuente: Estudio Geotécnico Plan de Auscultación. Geotecnia de estaciones. Estación Avenida Chile. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (202006-DF-PR03-DOC-10-VF)

- Instrumentación durante construcción y operación (202006-DF-PR03-DOC-32-VF): no se entra en detalle en la propuesta que el documento hace en lo referente a las mediciones en los túneles excavados con tuneladoras EPB, en cambio se resume lo relacionado con las pantallas preexcavadas y edificaciones circundantes.
  - **Auscultación del entorno. Control de edificios y servicios:**
    - Control de fisuras en edificios:
      - Antes del inicio de la ejecución de las obras debe levantarse un registro fotográfico con todos los edificios que puedan resultar afectados, teniendo en cuenta factores como el tipo de cimentación, la existencia de sótanos, altura, antigüedad, proximidad a la excavación, proximidad a redes de servicios, y valor histórico. Ese registro debe alimentar –a manera de estado inicial– un historial de grietas o fisuras que debe ser actualizado semestralmente (o puntualmente cuando se reporte la aparición de nuevas grietas).
      - La escala de clasificación de las grietas se basa en la planteada por la BRE (Buildings Research Establishment).
      - Se plantea que, de ser necesario, las grietas pueden ser instrumentadas.
    - Control de desplazamientos de edificios:
      - Para controlar los movimientos de los edificios circundantes al trazado del proyecto se recomienda el uso de niveles de precisión.
      - No se establece un criterio para definir el área de influencia del proyecto, textualmente la recomendación es: *“Es importante tener soluciones estudiadas para los edificios singulares, entendiendo como tales aquellos en los que las excavaciones inciden de una forma más directa por la proximidad de la excavación, porque se esté trabajando bajo ellos o porque se encuentre en mal estado. En estos edificios singulares habrá de programarse un control más riguroso en el sentido de que puede ser necesario, incluso instrumentar algunas partes vitales del edificio”*. Y, *“El control de los posibles movimientos verticales en los edificios más próximos a las obras se realizará mediante escalas graduadas de nivelación colocadas en elementos como fachadas, pilares o muros de carga (en general, en los elementos estructurales de la edificación) de los edificios o estructuras que se encuentren en el área de influencia de las obras. Su instalación consistirá en la colocación en la fachada o en el elemento estructural del edificio de un soporte cilíndrico o en forma de diábolo que se instalará mediante una perforación fijándose al hormigón con resina epoxi o mortero de fraguado rápido, y del que se “colgará” la escala graduada en el momento de realizar la medición”*.
  - **Control de movimientos en pantallas:**
    - Para el control de estos desplazamientos y sus efectos en el entorno, la recomendación planteada fue trazar secciones de control a lo largo de la línea, con las características y cantidades mostradas en la siguiente página.
    - También, para establecer niveles de amenaza asociados con las mediciones recolectadas en el plan de monitoreo se planteó una escala de umbrales de movimientos admisibles, que se presenta en la siguiente página.

Tabla 5. Cantidades para la instrumentación de secciones a lo largo del corredor del proyecto L1MB 2014.

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

Túnel entre pantallas:

Tipo	Frecuencia	Unidades y situación
<b>Arquetas de subsidencia</b>	Cada 25 m	Se colocaran a 3 m del trasdós de la pantalla y al tresbolillo
<b>Secciones de Monitoreo completa, cada 150 m y consistentes en:</b>		
Células de presión total		Entre cinco y siete, dependiendo del tipo de sección: una en contrabóveda y de cinco a seis en pantallas (en su trasdós y dos en el intradós en el contacto con la contrabóveda).
Extensómetro de cuerda vibrante		Entre cinco y catorce pares dependiendo del tipo de sección. Se dispondrán por parejas en estructura de hormigón: una pareja en contrabóveda, una pareja en losa intermedia y otra losa superior, una pareja por perfil de arriostamiento. El resto en pantallas (en puntos con sollicitación máxima). Una pareja en cada arriostamiento metálico.
Dianas reflectantes		Entre dos y doce dependiendo del tipo de sección. Se colocarán todas en pantallas laterales.
Pernos de convergencia		Entre dos y doce, dependiendo del tipo de sección. Se colocarán todos en pantallas laterales.
Piezómetro abierto o de Casagrande		Uno por sección, con una profundidad de 1 m por debajo de la profundidad del N.F. superior.
Piezómetros de cuerda vibrante		Uno o dos dependiendo del tipo de sección. El más somero entre 3 y 5 m por debajo la contrabóveda y el más profundo 5 m por debajo del pie de pantallas.
Inclinómetro		Dos, uno en cada pantalla, empotrados cinco metros bajo el pie de las pantallas. Ver nota 1
Arquetas de subsidencia combinada		Tres en el trasdós de cada una de las pantallas. Transversales al eje del túnel, separadas del trasdós 5 m, 15 m y 30 m, respectivamente. Se adaptarán a la distancia de los edificios.
Clavos de nivelación		Dos, en los extremos de la losa de cubierta junto a los inclinómetros.

Nota 1: Se colocará un inclinómetro entre el edificio y trasdós de la pantalla, si este se encuentra a una distancia inferior a 5 m del trasdós de la pantalla.

Fuente: Estudio Geotécnico Plan de Auscultación. Plan de auscultación. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (202006-DF-PR03-DOC-32-VF)

Tabla 6. Umbrales de movimientos admisibles establecidos para el control de los efectos de las obras del proyecto L1MB en el entorno de los segmentos de túnel entre

MOVIMIENTOS ADMISIBLES									
UMBRAL DE CONTROL	ASIENTO ADMISIBLE (mm)			DISTORSIÓN ANGULAR			DEFORMACION HORIZONTAL UNITARIA (%)		
	Verde	Ámbar	Rojo	Verde	Ámbar	Rojo	Verde	Ámbar	Rojo
Zonas sin edificaciones.	<50	50 a 100	>100	<1/100	1/100 a 1/50	>1/50	<1,5	1,5 a 2,0	>2,0
Edificios cimentados profundos o con losa, en buen estado. Conducciones de no gas.	<20	20 a 30	>30	<1/1000	1/1000 a 1/500	>1/500	<0,15	0,15 a 0,20	>0,20
Estructura subterránea o túneles existentes.	<15	15 a 25	>25	<1/2000	1/2000 a 1/1000	>1/1000	<0,15	0,15 a 0,20	>0,20
Edificios cimentados superficialmente, sin daños aparentes.	<10	10 a 15	>15	<1/2000	1/2000 a 1/1000	>1/1000	<0,15	0,15 a 0,20	>0,20
Edificios cimentados superficialmente con daños. Edificios monumentales. Edificios con más de 10 alturas (con cimentación profunda). Tuberías de gas.	<5	5 a 10	>10	<1/3000	1/3000 a 1/2000	>1/2000	<0,05	0,05 a 0,10	>0,10
Túneles existentes.	10 mm/10 m								

Tabla 3. Umbrales de riesgo de movimientos admisibles.

Fuente: Estudio Geotécnico Plan de Auscultación. Plan de auscultación. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (202006-DF-PR03-DOC-32-VF)

#### 2.2.10.4 BENCHMARK (experiencias internacionales)

A nivel internacional el caso más relevante en cuanto a la construcción de Sistemas de Metro es el de la Ciudad de México, esta afirmación se basa en dos factores:

- Existe cierto parecido en el tipo de suelo predominante en esa ciudad el encontrado en Bogotá: en ambas el área urbana se ha desarrollado sobre los suelos lacustres blandos depositados en una cuenca sedimentaria. A nivel de detalle se pueden identificar importantes diferencias entre los suelos de las dos ciudades, pero para los efectos de este documento no es necesario mencionarlas.
- El Sistema de esa ciudad empezó su construcción hace más de 50 años, y a hoy opera una gran variedad de tipologías, entre las que están las propuestas para la Línea 2 del Metro de Bogotá:

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

- Subterránea.
- Semienterrada.
- Elevada.

Covitur (Comisión de Vialidad y Transporte Urbano) publicó en 1986 las Especificaciones Para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México, entre esas especificaciones están las siguientes secciones:

- 2.01.03. Mecánica de Suelos.
- 3.01.04. Líneas Subterráneas en Túnel.
- 3.01.05. Líneas en Estructuras elevadas.

La misma comisión publicó en 1987 el Manual de Diseño Geotécnico, que se divide en cuatro volúmenes:

- El primero cubre los estudios geotécnicos y diseño del Metro en cajón.
- El segundo cubre el diseño del Metro en túnel.
- El Tercero, el diseño del Metro elevado.
- Y el cuatro los Procedimientos de Construcción.
- Esta consultoría tuvo acceso al primero de estos volúmenes.

También de origen mexicano, pero generados por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, está el Manual de Construcción Geotécnica, publicado en 2002. Este se divide en cinco partes:

- Contención de excavaciones.
- Refuerzo de suelos.
- Mejoramiento masivo de suelos.
- Inyecciones.
- Control de agua en el suelo.

Se obtuvo acceso a este manual, y las soluciones ahí planteadas servirán de referencia para el planteamiento de las soluciones de cimentación y mejoramiento para el tramo elevado de la Línea y para el Patio Taller.

## 2.2.10.5 CONCLUSIONES

- En este documento se hizo la revisión de documentos y mapas relacionados con dos componentes técnicos del diseño de la Línea 2:
  - Por un lado, se hizo la consulta de información cartográfica relacionada con la zonificación geológica, geomorfológica, hidrogeológica y de amenazas. El resultado de esta consulta es una caracterización geológica-geotécnica inicial del corredor, que se puede resumir así:
    - El trazado de la línea planteada recorre la ciudad de Oriente a Occidente y atraviesa materiales de origen predominantemente lacustre, con una única excepción: el tramo inicial del trazado entre la Carrera 7 y la Av. Caracas, en este tramo se espera encontrar material más grueso, de origen aluvial y coluvial.
    - En términos de amenazas de origen geotécnico las identificadas se pueden dividir, según su origen, así:
      - Natural: están las asociadas a la localización del proyecto, es decir las propias de la ciudad de Bogotá: inundaciones, subsidencia, movimientos en masa, licuación (o ablandamiento cíclico) y amenaza sísmica.
      - Causadas por la construcción de la infraestructura: entre estas está el potencial que las obras subterráneas desarrolladas tienen para acelerar procesos de subsidencia causados por descensos en el nivel freático. En este escenario es fundamental entender cuál será el efecto del proceso en dos niveles:
        - El primero es el que van a sufrir las edificaciones existentes.
        - El segundo es el que sufrirá la infraestructura subterránea que va a interactuar con un corredor de la ciudad en el que se espera una renovación urbanística en la que se va a pasar de edificaciones relativamente pequeñas cimentadas superficialmente a edificaciones de 10 o más pisos, con sótanos y cimentaciones profundas.
    - Por otro lado se revisó la documentación relacionada con las dos versiones de diseño de la Línea 1 del Metro en la ciudad, esto para complementar la caracterización geotécnica en los puntos en los que estos trazados se cruzan con el propuesto para la Línea 2 y para analizar las soluciones de diseño planteadas para la cimentación de los apoyos de viaductos como el planteado en el tramo final de la Línea 2.
      - La caracterización encontrada en estos informes permite afirmar que ambos proyectos cruzan el trazado de esta Línea 2, el primero a la altura de la carrera 11 y el segundo en la Avenida Caracas. La caracterización del suelo en esos sitios muestra que el suelo tiene un origen aluvial en el que predominan las arenas gruesas.
  - Es fundamental la construcción de un modelo geológico-geotécnico detallado que permita desarrollar los análisis y dimensionamientos correspondientes a esta etapa del proyecto. Para eso se está ejecutando en campo el Plan de exploraciones.
  - En términos de experiencias internacionales se encontró documentación desarrollada en México para la construcción del Metro en Ciudad de México. Lo encontrado en esa documentación sirve de guía en la formulación de soluciones de diseño en las siguientes fases del proyecto.

Desde una perspectiva global, la información recopilada en este informe permite llegar a las siguientes conclusiones:

- Se encontró que la zonificación planteada en el entregable 5.1 logra representar la variación de las propiedades de los suelos en el corredor. Sin embargo, para efectos del diseño de las obras relacionadas con la L2MB hará falta refinarla para que represente también las zonas de respuesta sísmica de la Microzonificación Sísmica de la ciudad.

- Lo relacionado con las obras subterráneas de la L2MB se trata en los documentos asociados a las ET24 y 25 de esta Debida Diligencia. La información revisada en este documento contribuirá al diseño de esas obras, como referencia, desde el punto de vista de la caracterización de los materiales del corredor. Por ejemplo, la caracterización de los sitios en los que la Línea 1 (tanto la subterránea como la aérea) cruza con la L2MB permite prever las condiciones geotécnicas asociadas a materiales predominantemente granulares, esto condicionará aspectos como la profundidad de las pantallas en el caso de las estaciones o el método de avance para la excavación del túnel.
- En cuanto al diseño de la cimentación del segmento elevado del trazado se tiene como referencia lo desarrollado en los diseños de la Línea 1 (que actualmente está en construcción): de ese proyecto se tiene el desarrollo de las pruebas de carga en pilotes en varias zonas de la ciudad, si bien esas zonas no se traslapan con el segmento elevado de L2MB, los resultados de las pruebas servirán como referencia para el diseño de los pilotes para la fundación de este componente.
- En este documento se resumen los hallazgos en la revisión de información de referencia en temas como geología, geomorfología, microzonificación sísmica y zonificación de amenazas; además, se incluyó un análisis de resultados de exploración del subsuelo de proyectos que cruzan el trazado de L2MB. Toda esta información sirve de insumo y referencia para los diseños de las obras subterráneas y a nivel, y va a contribuir a la toma de decisiones en aspectos como el dimensionamiento de elementos de cimentación y contención, y también en los análisis relacionados con la excavación del túnel. También se muestran las observaciones principales de un recorrido a lo largo del corredor en el que se identificó una serie de sitios en los que por condiciones particulares (altura de las edificaciones, importancia – puentes vehiculares o asentamientos visibles) puede ser necesario hacer análisis particulares.

Los datos y estudios que se analizaron en el marco de la debida diligencia técnica son los siguientes:

- Estudio de prefactibilidad del proyecto de PLMB (UT Egis-Steer David; 2020-2021),
- Estructuración técnica de la PLMB (UT Metrobog, 2017-2019),
- Diseño detallado del deprimido vial de la Avenida Caracas / Calle 72 de la PLMB (Metro Línea 1 SAS, 2021).
- Estudio Geotécnico Plan de Auscultación. Geotecnia de estaciones. Estación Avenida Chile. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (202006-DF-PR03-DOC-10-VF). Metro Línea 1, 2014.
- Diseño para la Primera Línea del Metro en el marco del Sistema Integrado de Transporte Público -SITP- para la ciudad de Bogotá. Producto 03. Estudio geotécnico-Plan de auscultación-Geotecnia de Patios y Talleres. (202006-DF-PR03-DOC-40-VF).
- Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. (INGEOMINAS, 2002).
- Memoria. Resúmenes Ejecutivos. Diseño para la Primera Línea del Metro en el Marco del Sistema Integrado de Transporte –SITP– para la ciudad de Bogotá. (00-202006-DF-MEM-RESEJEC-PRES-01-VF). (Metro Línea 1, 2014).
- Modelo Hidrogeológico Conceptual del Acuífero Subsuperficial o Somero en el Perímetro Urbano del Distrito Capital, (Secretaría de Ambiente, 2017).
- Diseño geotécnico del Patio Taller – Adecuación del terreno – Conformación de la plataforma (L1T1-1500-100-CON-ED-GEO-IN-0001). (Metro Línea 1 SAS, 2021).
- Mapping Land Subsidence in Bogotá, Colombia, Using the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Technique with TerraSAR–X Images. (Mora-Paez, Díaz-Mila & Cardona, 2020). <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.16>
- Especificaciones Para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México. (Covitur, 1986).
- Manual de diseño geotécnico. (Covitur, 1987).

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

- Manual de construcción geotécnica. (Instituto Mexicano de Mecánica de Suelos).