

**XIV CONGRESO COLOMBIANO DE GEOTECNIA &  
IV CONFERENCIA SURAMERICANA DE INGENIEROS GEOTÉCNICOS JÓVENES**

**RELATORÍA: FORO DE DISCUSIÓN - METRO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.**

Fecha: Viernes 17 de Octubre de 2014  
Lugar: Centro de Convenciones Villa Santa María – Salón El Moral (1<sup>er</sup> Piso)  
Hora: 5:00 p.m. a 7:00 p.m.  
Presidente de la Sesión: Prof. Álvaro Jaime González García (Ex-Presidente SCG)  
Secretario de la Sesión: Álvaro Luís Gómez Fernández (Auxiliar SCG)

**INTRODUCCIÓN**

En el marco del XIV Congreso Colombiano de Geotecnia & IV Conferencia Suramericana de Ingenieros Geotécnicos Jóvenes y su tema central “*Efectos geotécnicos del cambio climático*”, se desarrolló un espacio destinado para un Foro de Discusión sobre el avance hasta la fecha del Diseño Básico Avanzado de la Primera Línea del Metro-PLM para la ciudad de Bogotá D.C.

**ORDEN DE LA SESIÓN**

**INTERVENCIONES ACERCA DE LA 1ª LÍNEA METRO PARA BOGOTÁ D.C.**

1. Ing. Juan Pablo Jiménez Castro - IDU. (Aspectos Generales del Proyecto)
2. Dr. Jorge Alberto Rodríguez O. – Consorcio Línea 1 (Aspectos Sísmicos)
3. Geól. Alberto Loboguerrero U. – Asesor IDU (Hidrogeología de la Zona)

**PANEL DE DISCUSIÓN**

4. Dirigida por el Profesor Álvaro J. González G.

## **DESARROLLO DE LA SESIÓN**

### **Inq. Juan Pablo Jiménez Castro- IDU- Aspectos Generales del Proyecto**

El antecedente más cercano acerca de la investigación geotécnica fue la Microzonificación Sísmica de Bogotá que inició en 1997, generada por 38 sondeos en la superficie de la ciudad con una profundidad máxima de 240 m, algunos de los cuales alcanzaron el estrato terciario o rocoso. En el 2007 se realizó un estudio que permitió la actualización de la microzonificación sísmica logrando contar con aproximadamente 197 puntos de información a través de la toda la ciudad

En cuanto a la exploración que se hizo para realizar los estudios de la Primera Línea del Metro de Bogotá, se tienen 332 sondeos de alta calidad con un espaciamiento de 50 m entre cada uno, con una profundidad de 50 m a lo largo de la línea y alrededor de 16,000 metros lineales con extracción continua de testigos, además de la implementación de 6 sondeos profundos que permitieron llegar hasta la roca, uno de ellos alcanzó una profundidad de 306 m ubicado en la NQS por Av. 1ª de Mayo.

En este momento se cuenta con una cantidad importante de ensayos como: resistencia, clasificación, triaxiales, Bender Element con columna resonante, SPT, piezocono (estándar y análisis de parámetros físicos), consolidación, piezométricos, permeabilidad, piezómetros electrónicos con cuerda vibrante, gofísicos con Down-hole, líneas de reflexión y refracción sísmica.

Como aportes del estudio se pueden resaltar los modelos estratigráficos detallados con una calidad de información geotécnica de estándares internacionales, ensayos SPTU, Down-Hole y una cantidad importante de ensayos de laboratorio ya mencionados. Sin embargo es importante hacerle una serie de actualizaciones a los estudios existentes de acuerdo a la normativa que rige para Bogotá D.C., además de contar con un modelo hidrogeológico para la ciudad de gran aporte para el análisis de la Primera Línea del Metro de Bogotá.

Durante la presentación se mostraron algunos equipos de rotación implementados en los estudios realizados que permitieron hacer la extracción de núcleos, con un porcentaje del 96% de extracción de los 332 sondeos.

Analizando los resultados obtenidos de los sondeos profundos realizados, se establece que es importante hacer actualizaciones en algunos sectores del mapa de Amenaza Sísmica de Bogotá. Seguidamente el modelo geológico-geotécnico expuesto en la sala, ha permitido lograr un perfil a partir de todos los ensayos realizados y obtenidos a través de la exploración del subsuelo, con una profundidad de 50 m, construyendo imágenes de estratigrafía de la línea, identificando la influencia del estrato terciario.

Durante el estudio se determinaron 3 clases de estaciones en la Primera Línea del Metro, las cuales varían según el ancho de la estación (34 m, 30 m, 26 m), el cual depende a su vez de las características del sitio donde esté ubicada dicha estación.

Debido a efectos constructivos, en las estaciones Tipo 3 (26 m) se ha propuesto realizar las excavaciones por medio de tuneladoras, sin embargo hacía el sector de Lourdes se ha decidido realizar la construcción entre pantallas debido al tipo de suelo que se presenta en la zona.

## **Dr. Jorge Alberto Rodríguez O. – Consorcio Línea I - Aspectos de Asentamientos y Sísmicos**

Los asentamientos regionales en el Distrito Capital son bastantes comunes, presentando unos asentamientos máximos de unos 7 cm/año, sin embargo la 1ª línea del Metro no pasa por zonas complicadas según un estudio presentado por la DPAAE, asentamientos los cuales se pueden modelar por medio de mapas hidrogeológicos que permitirían controlar los efectos hidrogeológicos que se presentan normalmente hacia la zona del borde del Piedemonte Llanero.

Por medio del análisis de los mapas hidrogeológicos más actualizados hasta la fecha, se logra determinar que las zonas con más tasas de bombeo que se ven influenciadas por las zonas de recarga de los cerros orientales coinciden con aquellas zonas que presentan tasas de asentamientos regionales altos, sin embargo dicha situación no tiene gran influencia para el Tramo I de la actual línea del Metro.

En la zona del Lago, los asentamientos diferenciales se deben a suelos coluviales típicos influenciados por agua a presión que no facilita en gran medida la etapa constructiva, al realizar el análisis se evalúan una serie de presiones a las cuales están sometidos los suelos lacustres, adicionalmente como las edificaciones de la zona cuentan con unos cimientos profundos debido a la zona de ubicación, permiten generar una cubeta de asentamientos diferenciales del orden de 70 cm, dicha cubeta se pudo analizar gracias a la información obtenida a través de todos los ensayos de exploración, permitiendo determinar una tasa de asentamientos alta, que a su vez va disminuyendo con el tiempo, todo lo mencionado con el fin de establecer una relación similar de la cubeta de asentamientos en la implementación del Metro, los cuales deben ser controlados a cabalidad, principalmente logrando un efecto de impermeabilidad en los suelos afectados.

En la geotecnia sísmica fue necesario mirar los desplazamientos del terreno y la interacción suelo estructura, ya que son estructuras enterradas y tendrán una dinámica importante en el momento de enfrentarse al sismo, lo que genera la inquietud, ¿Cuánto puede moverse el suelo y la estructura analizando su interacción?, lo que conlleva a evaluar la norma con sus espectros de diseño y si estos son necesarios para un proyecto de tal envergadura, para ello se utilizan funciones de amplificación lo que permite extrapolar datos de sismos anteriores para lograr determinar un sismo de diseño, que para este caso es el sismo de Quetame, del cual se tiene información valiosa que permite realizar las funciones de amplificación ya mencionadas.

Al realizar los análisis del sismo de diseño, es importante tener en cuenta que el efecto físico no ocurre como lo especifica la norma (una sola dirección) sino ocurre en las 3 direcciones, lo que genera la necesidad de crear metodologías para lograr la interacción del movimiento en 3 direcciones y teniendo en cuenta el comportamiento de las zonas a nivel Distrital, las cuales tuvieron un comportamiento representativo según los datos recolectados durante el sismo de Quetame.

## **Geól. Alberto Loboquerrero –Asesor IDU- Hidrogeología de la Zona**

Para realizar una estructura que cumpla con sus objetivos de durabilidad, productividad, serviciabilidad y demás de una obra de infraestructura se debe realizar inversiones de gran envergadura que permitan realizar una apropiada investigación para lograr los mejores resultados.

Tratando de lograr una comparación como objetivo de aprendizaje entre la experiencia con la que cuenta Medellín, y lo que quiere lograr Bogotá se debe establecer bajo ciertas pautas, como lo es la topografía del sitio, su geología y geomorfología, lo cual se diferencia a gran escala de lo existente en Bogotá, además de que la ciudad paisa cuenta con un Metro en superficie, cosa totalmente distinta a lo que sea desea obtener en la Capital, por lo cual en cierta medida no es viable guiarse por la experiencia con la que cuentan los paisas.

La ciudad de Bogotá es una cuenca cerrada aguas arriba del Tequendama, cuenta con la historia de haber sido un gran lago que se colmató en algún momento, permitiendo tener sedimentos en todo el terreno debido a la erosión ocurrida en cuerpos de agua, adicionalmente se tiene registro que durante el pleistoceno (2 millones de años atrás) se tuvieron glaciares de montaña lo que explica porque se cuenta con depósitos fluvioglaciares, y depósitos de morrenas.

Posteriormente dentro de la geomorfología del sitio se puede reconocer la Falla Bogotá que separa la Formación Guadalupe que se manifiesta desde la zona del Alto del Vino y la Formación Guaduas, encima de esta se presenta la Formación Arenisca del Cacho que a su vez se encuentra debajo de la Formación Bogotá, la cual subyace el Cuaternario. En el piedemonte se encuentra gran cantidad de material erosionado y transportado por cuerpos de agua.

En la base de la Formación Sabana se encontró una capa de aproximadamente 28 m de espesor de areniscas, arcillolitas y limos, información la cual permitió tomar la decisión de colocar filtros en la parte más impermeable, logrando evacuar agua con un caudal aproximado de 2.5 L/s (sin bomba), lo que probablemente esté conectado con las filtraciones que se realizan desde el borde oriental de la ciudad y con las filtraciones de los abanicos aluviales.

Hoy en día y siendo consciente de la cantidad de demanda que se tiene en el sistema de transporte de Bogotá, la solución de un Metro subterráneo es muy viable para la ciudad, ya que en superficie no hay espacio suficiente para aplicar un sistema de tal magnitud. Al construir un túnel con tuneladora, los inconvenientes presentados se minimizan a nivel de superficie gracias a que no habría mayor afectación sobre la zona intervenida (en el caso de la movilidad), sin embargo al construir entre pantallas promoverá problemas de movilidad debido a la intervención que debe ser realizada desde la superficie.

## **PANEL DE DISCUSIÓN:**

En la mesa de discusión estuvieron presentes los expositores: Ing. Juan Pablo Jiménez, Dr. Jorge Alberto Rodríguez, Geól. Alberto Loboguerrero, Profesor Gabriel Auvinet y Profesor Álvaro González, así como el Ing. Carlos Acero, del Consorcio L1.

### **Dr. Bernardo Caicedo:**

A raíz de una exploración tan detallada, se establecía el análisis de la interacción entre la perforación y las construcciones vecinas, representada por medio de una curva gaussiana, pero al realizar la comparación con las perforaciones, estos argumentos físicos no representan un suelo homogéneo como lo dice el análisis realizado, teniendo en cuenta lo mencionado ¿Qué se propone para realizar estudios más detallados acerca de las afectaciones que se pueden ocasionar en las propiedades vecinas?.

#### **1 Respuesta:**

Se aclara con lo expuesto por el Ing. Juan Pablo Jiménez del IDU, es información general del estado actual de la investigación, por lo cual los temas de diseño no se han tocado en el momento por su complejidad, éste se desarrolla lentamente a medida que se cuenta con más información. Teniendo en cuenta que hasta la fecha se sigue realizando perforaciones, por lo cual las afirmaciones realizadas durante la charla son conclusiones obtenidas bajo criterios de comparación de casos anteriores y análisis detallados por medio de la estratigrafía existente.

En el tema de diseño se ha ido avanzando circunstancialmente y en manos del Consorcio encargado, sin embargo no hay personal presente en el panel de discusión para profundizar el desarrollo y los logros obtenidos acerca del diseño establecido.

### **Prof. Álvaro González:**

¿Cómo es la exploración que se ha realizado para el metro de México, densidad y profundidad y variabilidad encontrada en comparación con la de Bogotá?

#### **2 Respuesta:**

Prof. Gabriel Auvinet: Para el tema del Metro de México, se presenta una variabilidad de pensamiento en el momento de afrontar el problema, ya que en el valle de México se le da un énfasis importante a la geología, información la cual no se ha logrado con claridad en la ciudad de Bogotá ya que en el momento no hay propiedades índice que permitan realizar algunas aproximaciones acerca de la geología.

En la densidad de exploración, en México se han realizado perforaciones con un distanciamiento aproximado de 200 m.

#### ***Intervención Ing. Félix Alonso (Campaña de Geotecnia)***

Los sondeos se han hecho cada 100 m en Bogotá, sin embargo entre cada sondeo se encuentra ubicado un piezocono, se aclara que el perfil mostrado a los asistentes es netamente geotécnico. Se aclara que cada uno de los sondeos realizados cuenta con una “hoja de vida” que permite tener información fotográfica y técnica de cada uno de los ensayos realizados a las muestras.

**Prof. Álvaro González:**

En los estudios realizados se ha tenido en cuenta las deformaciones no sísmicas, es decir las deformaciones estáticas producidas por la excavación del terreno, qué expansiones y contracciones se han contemplado en el momento de iniciar las obras, además de las presiones de poros esperadas, asentamientos horizontales y verticales, entre otros?

**3 Respuesta:**

Los cálculos mencionados se han realizado, sin embargo no se cuenta con información en el momento, debido al corto tiempo dispuesto para realizar la presentación ante los asistentes del XIV CCG.

**Dr. Adolfo Alarcón:**

Al estar en presencia de presiones artesianas, que tienen la posibilidad de generar flujos, ¿Dichos flujos fueron tenidos en cuenta para realizar los modelos y su influencia en la resistencia con el tiempo?

Las respuestas obtenidas en suelos blandos, teniendo en cuenta que las ondas se transmiten por diversos medios y en diferentes direcciones, además de ello ¿Qué se ha logrado concluir cuando la onda pasa de un suelo blando a un suelo duro?

**4 Respuesta:**

Los efectos mencionados, por colocar un ejemplo, ocurren entre los cerros de Suba y los cerros Orientales, en los análisis de subsidencia las fronteras observadas son las presiones hidrostáticas del modelo con efectos de flujo vertical, sin embargo en el momento no se puede afirmar si el efecto de los flujos se ha tenido en cuenta para las demás modelaciones realizadas.

**Sin Identificar:**

Buena parte del conocimiento de Bogotá, se ha logrado por hacer estudios de palinología, ¿Se ha logrado algún avance de esta índole en los estudios realizados?, 1644 y 1966 se tiene la idea de que ocurrieron sismos con un foco cercano, probablemente en las inmediaciones de Usme. ¿Cómo se ha tenido en cuenta y aplicado esta información?

**5 Respuesta:**

Los registros realizados por medio del estudio de palinología contienen información muy valiosa que puede interactuar con los estudios realizados, sin embargo en la fecha no se tiene establecido realizar la correlación de información debido al tiempo de trabajo establecido.

Para el efecto de tener un epicentro cercano se ha tenido en cuenta las mediciones logradas a raíz del sismo de Quetame, en los cuales se pueden variar las fuerzas sísmicas en el modelo si se desea tener un epicentro más cercano.

**Dr. Julio Colmenares:**

¿Cuál fue el nivel de confiabilidad de la exploración teniendo en cuenta que fue un trabajo muy extenso para tan corto tiempo? Adicionalmente, qué avances se tienen en la mecánica de suelos sobre el conocimiento del suelo de la Sabana de Bogotá?

## **6 Respuesta:**

Los estándares aplicados para los protocolos de investigación fueron muy estrictos, con lo cual se puede afirmar que la confiabilidad de la exploración es muy aceptable.

Hay 25,000 ensayos de laboratorio realizados para el estudio, entre los cuales se resalta una gran magnitud de información que permitiría aumentar la investigación académica y experimental para la Sabana de Bogotá, sin embargo hasta el momento no se ha hecho.

Los suelos de la parte occidental y los de piedemonte son normales, y los suelos lacustres son un poco más sensitivos y con un comportamiento muy complicado, los suelos aluviales con los que se cuentan tienen un comportamiento más normal, por lo cual al realizar una pequeña comparación entre las condiciones de suelo de Bogotá y México, la diferencia puede radicar en los suelos lacustres

En la Ingeniería Colombiana no era cotidiano contar con una cadena de custodia tan estricta que permitiría disminuir todos los posibles factores de error, lo que permite asegurar que el proceso se puede afirmar como un avance ante los procesos de ingeniería llevados a cabo hasta el presente.

## **Sin Identificar:**

Hay un tramo importante de modelación, donde la concepción geométrica del túnel está dada con anterioridad y luego se realizan los estudios geotécnicos, no creen que se está desaprovechando un poco la información obtenida en el proceso de diseño que pueda tener una repercusión importante en el proyecto, adicionalmente qué parámetros son los que priman en el momento de tomar dichas decisiones.

## **7 Respuesta:**

El proceso de selección de las tecnologías utilizadas y los procesos constructivos elegidos fueron producto de una serie de interacciones que permitieron llevar a las conclusiones ya expuestas; para aclarar los parámetros que priman, se debe tener en cuenta que la parte geométrica es esencial en las decisiones tomadas, respectivamente las propiedades del suelo que son propias para cada estación del metro, y finalmente la parte sismológica fue tomada en cuenta evaluando la viabilidad y pertinencia de la información con la que se cuenta para cada zona de estudio.

### **Ing. Carlos Alberto Acero – Consorcio Línea 1 (Complementación):**

El plazo dado para el diseño y la campaña exploratoria fue de 15 meses, en donde éste se divide en 3 períodos, en la primera campaña el compromiso era realizar las perforaciones en toda la línea, posteriormente establecer unos criterios de decisión para la construcción teniendo en cuenta costos, protección de edificaciones, movilidad durante el proceso, afectación sobre los residentes, entre otros.

Como complemento del Profesor Álvaro González, se establece que los resultados expuestos en el perfil no hacen parte de presentación geotécnica y la concepción de diseño del proyecto, lo que se tiene es información hidrogeológica y dinámica de la geología, así que es prudente dejar entre el tintero lo no expuesto.

## **Dr. Bernardo Caicedo:**

En la modelación sísmica, cuando se hace el análisis de estructuras enterradas, para el desplazamiento se debe tener en cuenta las longitudes de onda, sin embargo los cálculos de las mismas no se vieron durante la presentación ¿Se tuvieron en cuenta?

## **8 Respuesta:**

Para determinar las longitudes de onda se determinaron algunos perfiles de desplazamiento relativos a lo largo del túnel que surgen del análisis, teniendo en cuenta que la longitud de onda esta explícita en los modelos mostrados.

## **Prof. Álvaro González:**

Se han visualizado muchos estratos arenosos ¿Son licuables?

## **9 Respuesta:**

Se ha determinado que los estratos no son licuables a partir del análisis de cada uno de las perforaciones realizadas además de una comparación en el tiempo, sin embargo considerando la extensión de cada uno de los estratos, a pesar de que fueran licuables estos no presentarían mayor inconveniente.

## **Intervención Dr. Carol Murillo:**

Con tanta información, sería necesario aproximadamente unos 5 años para lograr entender toda la información obtenida en las gráficas, por lo cual es un acto irresponsable del IDU exigir en 15 meses diseños cuando hasta la fecha está terminando la etapa exploratoria, lo que podría desencadenar una crisis en la etapa constructiva.

## **10 Respuesta:**

Hacia el mes de Enero se realizó una reunión entre las Sociedades para aclarar el tipo de inquietudes manifestadas, evaluando por medio de matrices de riesgo el avance del proyecto para la mitad del contrato determinando el riesgo como un riesgo bajo, lo que permitió aceptar el reto de ingeniería, en el presente se encuentra en gestión una nueva reunión con las Sociedades para mantener al tanto al gremio sobre los avances logrados, sin embargo se ha establecido que a pesar del tiempo en contra, se ha logrado hasta la fecha cumplir con los resultados esperados.

## **Intervención Ing. Jesús Salve del Consorcio L1:**

El estudio presentando es un estudio básico – avanzado, por lo cual es importante resaltar la labor presentada por el IDU ya que no es habitual lograr este tipo de exploración en tan corto tiempo, sin embargo es claro que la ciudad así lo necesita, adicionalmente vale resaltar que faltan varios estudios para concluir las inquietudes resaltadas hasta el momento para progresar rápidamente y concebir el diseño final de la línea del Metro.

## **Intervención Dr. Mario Camilo Torres-Presidente SCG.**

Extiende unas palabras de agradecimiento al Instituto de Desarrollo Urbano-IDU al aceptar el reto propuesto por las Sociedades, ya que en el momento de concebir el proyecto no era muy claro que se lograra cumplir todas las metas propuestas, sin embargo los resultados presentados en el XIV CCG deja relativamente tranquilos a los presentes, ya que la exploración presentada lleva un avance importante y ha cumplido con lo esperado por las entidades.



**Prof. Álvaro González:**

El Metro cuesta 15 billones de pesos, ¿Económicamente cómo se presentan cada una de las componentes? ¿Qué porcentaje de la demanda Bogotana va a satisfacer el Metro?

**11 Respuesta:**

Bogotá tiene un modelo único de movilidad que lo maneja la Secretaría de Movilidad, lo que permite establecer una oferta de demanda para el año 2021 una demanda aproximada de 45,000 pasajeros hora/sentido y con una demanda tope en el escenario del 2050 de 80,000 pasajeros hora/sentido, lo que representaría el doble de capacidad de los metros a nivel de Latinoamérica.

Ahora bien, el Metro dentro del sistema de transporte masivo en la ciudad de Bogotá estaría alojando del 45% al 50% de la demanda de la ciudad.

En cuanto al costo se obtuvo haciendo una evaluación de planos y mediciones en terreno a partir de los diseños realizados, donde el pliego de obligaciones tenía claridad sobre el trazado establecido para la línea del metro, además del estudio de demanda determinado logrando establecer unos criterios de alta calidad para garantizar el apropiado funcionamiento de sistema de transporte, permitiendo así destinar un 70% del presupuesto total en obra civil, el restante es el material rodante, ferroviario y demás gastos necesarios para implementar el sistema físico, adicionalmente es importante resaltar que la competencia en este tipo de proyectos es muy pequeña, lo que genera que los gastos de transporte y demás sean muy costosos en comparación con los precios en otras partes del mundo.

**Prof. Álvaro J. González G.**

Moderador Foro 1ª Línea Metro Bogotá D.C.

**Dr. Mario Camilo Torres S.**

Presidente SCG

Elaboró: OFPD

Revisó: MCTS

Aprobó: AJGG