

Caracterización sismo-geotécnica de la zona norte de Bogotá **Geotechnical and seismic characterization in northern Bogotá**

Jorge A. Rodríguez⁽¹⁾, Jaime Azuaje 2⁽²⁾

⁽¹⁾ Profesor, Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, Colombia.

⁽²⁾ Ingeniero, Coordinador de geofísica, Jeoprobe SAS, Colombia.

Dirección para correspondencia: Jorge.rodriguez@jeoprobe.com

Ingeniería Sismo Geotécnica

Resumen

El conocimiento de las propiedades geotécnicas del terreno de una zona urbana es de gran importancia para el desarrollo de su infraestructura, sobre todo si dicha zona es potencialmente susceptible a amenazas naturales, que ameritan la realización de estudios de microzonificación. Aun cuando la ciudad de Bogotá cuenta con un completo estudio de microzonificación sísmica, el nivel de detalle es insuficiente para comprender el comportamiento de los suelos, sobre todo en las zonas donde se cuenta con menos cantidad de información, como lo es el norte de la ciudad. El presente trabajo trata sobre el análisis de los datos obtenidos mediante la recopilación de 17 estudios geotécnicos ubicados a lo largo de un alineamiento de 33 km de longitud, comprendido entre las localidades de Usaquen y Tibitoc, al norte de la ciudad de Bogotá. Adicionalmente, se realizó una campaña geofísica superficial que comprendió la ejecución de 10 líneas, 10 mediciones de ruido ambiental HVSr y 10 arreglos de microtemores mediante la técnica de autocorrelación espacial (SPAC). Los resultados obtenidos permitieron la generación de un perfil de velocidades de onda de corte hasta el contacto con la roca, así como un resumen de propiedades geotécnicas y parámetros elásticos del suelo que sirven de complemento a los estudios de microzonificación de la ciudad de Bogotá, y como insumo para los nuevos proyectos de infraestructura a desarrollarse en la zona norte de Bogotá.

Palabras-clave: Propiedades geotecnicas, ondas de corte, parámetros elásticos, microzonificación, suelos.

Abstract

Knowledge about the geotechnical properties from an urban area is very important for the development of its infrastructure, especially if this area is potentially susceptible to natural hazards, which require the completion of microzonation studies. Even though the city of Bogotá has a complete study of seismic microzonation, the level of detail is not enough to understand the behavior of soils, especially in areas where there is a lack of information, such as the north of the city. The present work deals with the analysis of the data obtained through the compilation of 17 geotechnical studies located along an alignment of 33 km in length, between Usaquen and

Tibitoc, in northern Bogotá. In addition, a shallow geophysical survey was carried out. That included the execution of 10 seismic lines, 10 ambient noise HVSR measurements and 10 microtremor arrays using the spatial autocorrelation technique (SPAC). The results allowed the generation of a shear wave velocities profile until rock contact, as well as a summary of geotechnical properties and elastic parameters which are a complement for microzonation studies in the city, and the main input for new infrastructure projects to be developed in the northern area of Bogotá.

Keywords: Geotechnical properties, shear wave, elastic parameter, microzonation, soils.

1. Introducción

En el diseño sismorresistente de estructuras civiles, resulta de vital importancia la determinación de las propiedades del suelo, en especial aquellas que controlan su comportamiento dinámico. El estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá (Ingeominas – Uniandes, 1997), contempló una gran recopilación de información geológica, geotécnica y sísmica para la definición de los parámetros de diseño sísmico de estructuras, teniendo en cuenta los efectos locales del suelo bajo la acción de los sismos de diseño. Para ello se recopiló información de 177 puntos de análisis en toda la ciudad, lo que representaría un estudio cada 1.5 km aproximadamente.

La información disponible en general se limita a profundidades menores que 50 m, mientras que los perfiles de suelos en general tienen profundidades mayores. Esto implica que es necesario extrapolar los parámetros dinámicos en profundidad. Adicionalmente, la información disponible no se encuentra uniformemente repartida en la ciudad, encontrando sitios que carecen de información geotécnica confiable, sobre todo hacia los límites de la Bogotá.

El objetivo de la presente investigación es la generación de un modelo geotécnico hasta la roca, en un alineamiento de 33 km de longitud, comprendido entre las localidades de Usaquen y Tibitoc, al norte de la Ciudad de Bogotá. Para realizar la caracterización de los suelos se recurrió a la información de campo y de ensayos de laboratorio de suelos existente, producto de 17 estudios geotécnicos y se complementó con 10 mediciones de geofísica superficial.

2. Contexto geológico

La Sabana de Bogotá corresponde a una cuenca sedimentaria de origen tectónico en la que se ha depositado una serie de varios cientos de metros de depósitos no litificados. En esta secuencia se distinguen cuatro formaciones principales, Tilatá (Plioceno), y Subachoque, Sabana y Chía (Pleistoceno). Las tres últimas se formaron en el ambiente del gran lago que conformó la Sabana en el Pleistoceno sobre los últimos 2.4 Millones de años. La formación Sabana es la más reciente y presenta predominantemente depósitos arcillosos en la parte central con mayores intercalaciones de arenas, gravas y turbas, hacia los bordes de la cuenca, depositados entre 1 millón y 40.000 años aproximadamente. Aparentemente la diferenciación entre las formaciones Subachoque característica de depósitos más gruesos y Sabana, de depósitos finos, corresponde a la profundización del lago por subsidencia tectónica hace aproximadamente un millón de años. La secuencia estratigráfica del área ha sido establecida con precisión por los trabajos de Helmens (1990) y ajustada con base en investigaciones recientes (Rodríguez & Rodríguez, 2002).

La parte nor-oriental de la cuenca, correspondiente con la zona del presente estudio, está conformada hasta una profundidad menor que 200 m por una secuencia bastante uniforme de arcillas, arenas arcillosas, y turbas o lignitas de la formación Sabana, formados en un ambiente de niveles lacustres de profundidad variable que dieron lugar a los niveles arcillosos predominantes, intercalados con épocas de vegetación de páramo y subpáramo en el cuaternario. Debajo de esta formación se encuentran sedimentos más gruesos de la formación Subachoque. Los niveles de arenas están asociados con depositación fluvio - glacial en épocas interglaciales y los niveles de turba con épocas más cálidas.

La profundidad de la roca varía considerablemente en el sentido Este-Oeste, de acuerdo con la cercanía a los cerros orientales. La Figura 1 muestra el alineamiento del presente estudio, sobre un mapa de anomalías gravimétricas de Bouguer. Las zonas verdes y azules en el mapa representan mayores espesores de sedimentos de menor densidad, mientras que los colores amarillo y rojo de dicha escala se asocian a materiales más densos o menores espesores de depósito.

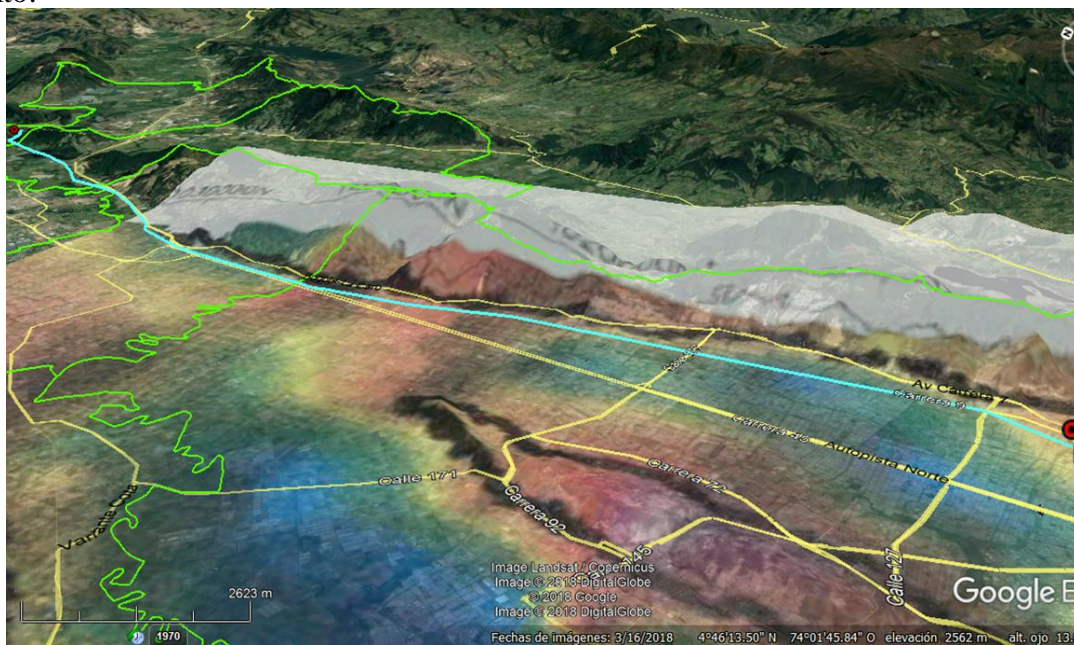


Figura 1. Mapa de anomalías residuales de Bouguer (Tomado de Ingeominas, 1997).

3. Metodología

Comprendió la recopilación de información de 17 estudios disponibles de respuesta sísmica local y estudios geotécnicos a lo largo del alineamiento, con el fin de establecer su origen y los parámetros geotécnicos que rigen su comportamiento dinámico. Dichos estudios cuentan con información de sondeos geotécnicos, ensayos de laboratorio, líneas sísmicas, ensayos de Down Hole y CPTu para profundidades menores que 50 metros, para lo cual se creó una base de datos en Excel, con la información recopilada, la que posteriormente se utilizó para la construcción del

perfil longitudinal de velocidades de ondas de corte. La Figura 2 muestra la distribución de los estudios previos realizados a lo largo del tramo de tubería analizado en el presente estudio. Los íconos de color amarillo, representan los estudios previos recopilados de 17 proyectos ejecutados por Jeoprobe SAS (2018) y los triángulos color naranja, representan la localización de los 10 estudios complementarios llevados a cabo en octubre de 2018.

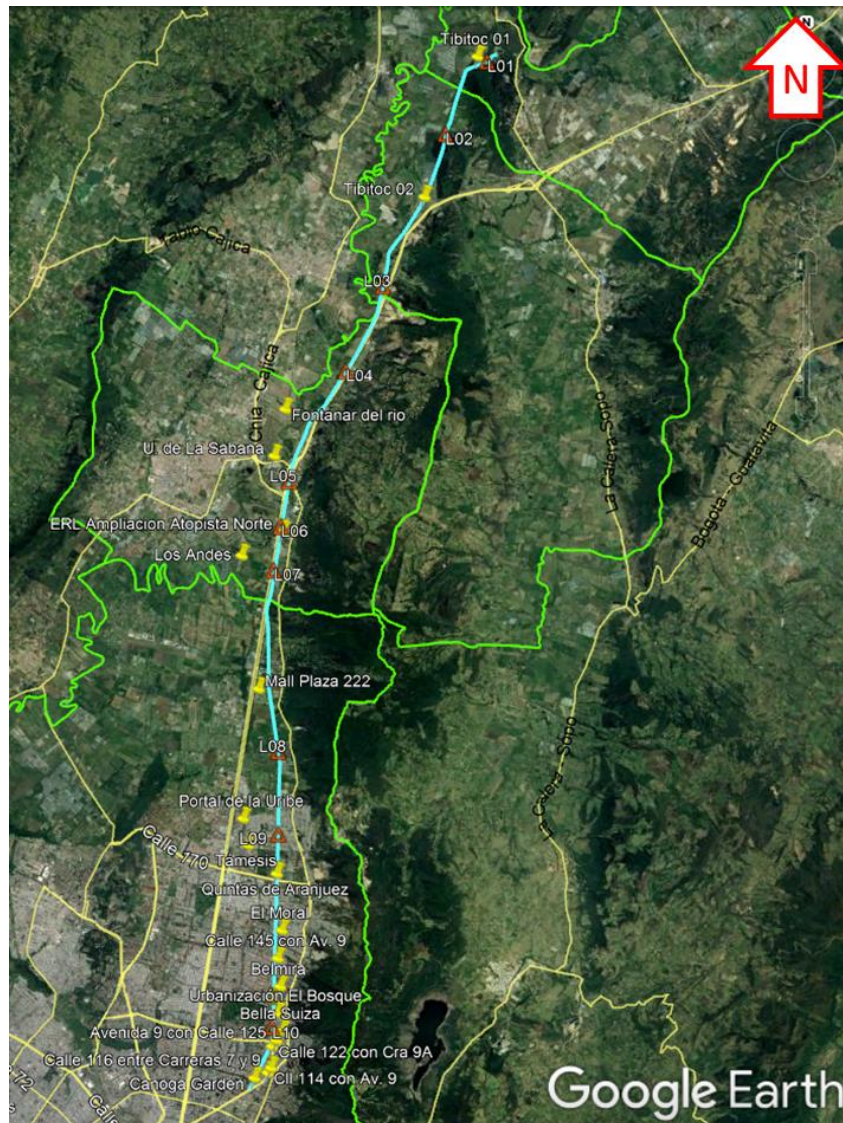


Figura 2. Mapa de anomalías residuales de Bouguer (Tomado de Ingeominas, 1997).

Basados en la información de referencia recopilada, se seleccionaron diez (10) sitios para la ejecución de mediciones de campo que comprenden ensayos geofísicos de dispersión de ondas superficiales DOS (Jeoprobe, 2018), mediciones de vibraciones ambientales HVSR (Rodríguez,

2019) y arreglos 2D de ruido ambiental SPAC (Rodríguez, 2019), los cuales, al ser complementados con la información disponible al inicio del estudio, permiten obtener un estimativo suficientemente completo del perfil de rigidez de los suelos y del espesor de los depósitos.

Las líneas sísmicas constituyen un muy buen método de exploración indirecta de los suelos para evaluar la rigidez dinámica de los materiales en condición inalterada, necesaria para un análisis de la respuesta sísmica; su ejecución en campo y la obtención de resultados es muy rápida y, además, permiten obtener, mediante correlaciones, parámetros para diseño geotécnico. El objetivo principal de las líneas sísmicas hechas para este proyecto es obtener perfiles de la variación de la velocidad de onda de corte (V_s), tanto en profundidad como a lo largo del corredor en que se hace cada línea, con el fin de conocer las propiedades de rigidez de los suelos existentes en el área.

4. Resultados y análisis

A partir de la recopilación de los estudios geotécnicos se obtienen los parámetros geotécnicos de la Formación Sabana. La Figura 3 muestra la variación del número de golpes SPT, el peso unitario y la relación de vacíos inicial en función de la profundidad. Como puede observarse en la tendencia principal del número de golpes SPT, su valor suele ser menor que 20 en los primeros 30 metros (salvo algunos casos aislados). Estos valores son característicos de la Formación, y en los primeros metros es usual encontrar valores menores que 5, lo que representa unas arcillas limosas muy blandas de reciente depositación. A partir de 30 metros los valores tienden a incrementarse, por presencia de una matriz de arena arcillosa y debido al confinamiento de los materiales. Los valores de peso unitario tienden a ser muy constantes con la profundidad y sus valores oscilan entre 1.4 y 1.6 T/m^3 . En el caso de la relación de vacíos inicial de los materiales, los valores oscilan entre 1 y 3, lo que representa un material bastante suelto, completamente saturado, y con valores de humedad que se esperan sean bastante elevados.

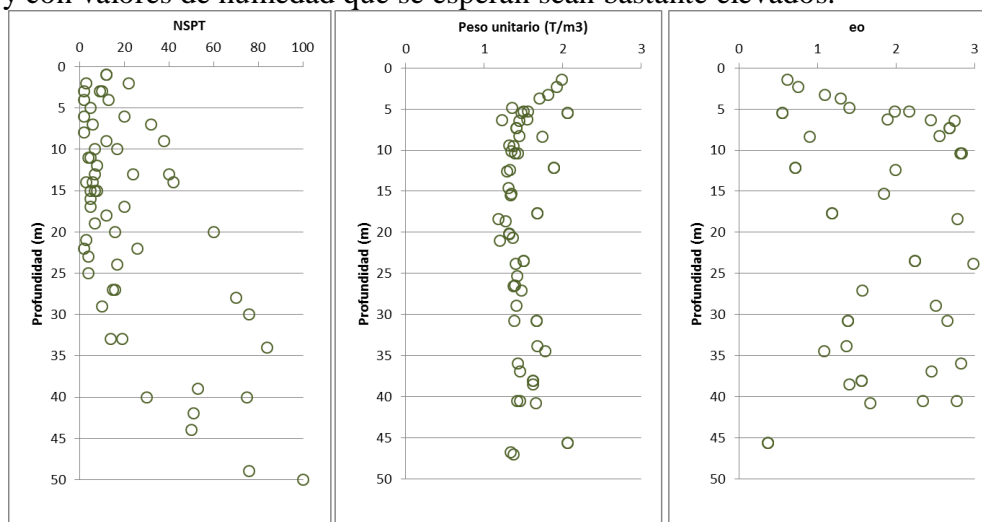


Figura 3 Parámetros geotécnicos de la Formación Sabana.

La Figura 4 muestra los valores de humedad natural y límites de consistencia de los materiales presentes en los primeros 50 metros de profundidad. Los valores de humedad natural de las arcillas blandas se encuentran comprendidos 50 y 180%, y poseen una tendencia constante hasta 30 metros de profundidad, donde sus valores tienden a descender. En el caso del límite líquido, los porcentajes varían entre 80 y 300%, y nuevamente se observa una tendencia a disminuir a partir de 30 metros. Los valores de índice plástico, muestran una tendencia muy parecida a los valores reportados de humedad, con valores máximos muy parecidos, lo que es una evidencia del comportamiento viscoso que presentan dichas arcillas ante una sobrecarga constante.

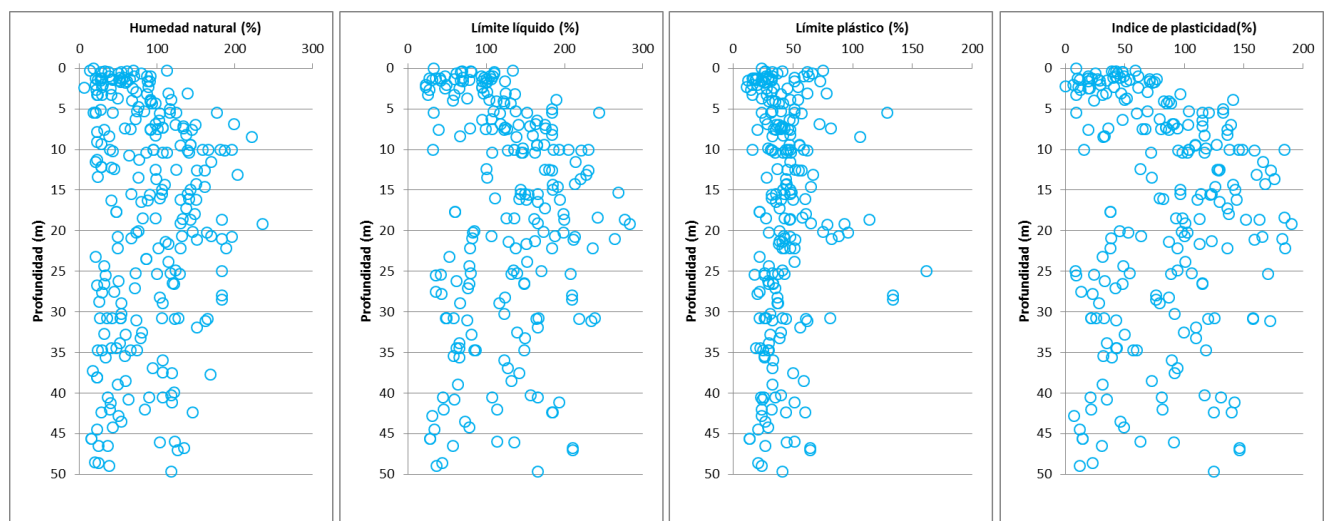


Figura 4. Variación de límites de consistencia en función de la profundidad para los suelos de la zona norte Lacustre de Bogota.

La Figura 5 muestra los resultados de todas las líneas sísmicas realizadas. En líneas generales, se observa una primera capa con velocidades de onda de corte promedio entre 110 y 140 m/s que se extiende desde superficie y hasta una profundidad que varía entre 10 y 70 metros dependiendo de la abscisa, cuyos mayores espesores se encuentran entre Usaquén y la calle 200 aproximadamente. Dicha capa se asocia con las arcillas blandas de la Formación Sabana. Posterior a dicha capa de arcillas blandas, se observa un estrato con velocidades promedio de 180 y 250 m/s, el cual se asocia a materiales limosos y arenosos de origen aluvial-coluvial, y que se extienden hasta el contacto con la roca meteorizada, el cual se encuentra a profundidades que varían entre 40 y 90 metros dependiendo de la zona en que se encuentre. La interpretación estratigráfica de los perfiles de velocidad fue corroborada con los sondeos geotécnicos en los sitios donde se tenían ambas informaciones y cotejada con la geología de la zona, observándose una correspondencia precisa.

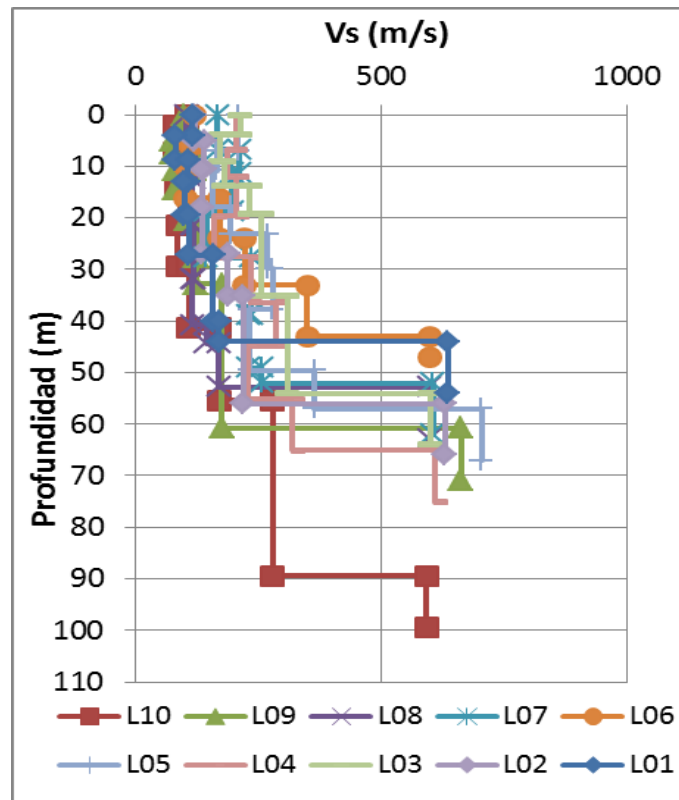


Figura 5. Valores de Vs obtenidos mediante la combinación de líneas sísmicas, HVSR y SPAC.

En los sitios donde se contaba con registros de perforaciones y ensayos geofísicos, se establecieron correlaciones entre el número de golpes NSPT y los valores de velocidad de ondas de corte medidos. En la Tabla 1, se compara la correlación establecida en el presente estudio, con diversas correlaciones propuestas a nivel internacional. Adicionalmente, se estableció una correlación entre los valores de velocidad de ondas de corte y la profundidad. Como es común, en suelos naturales, la rigidez de los materiales tiende a aumentar en función del confinamiento. Dicha tendencia se muestra con claridad en la **Figura 5**

Figura 6, y está representada por la línea de color azul.

Tabla 1. Correlaciones existentes entre V_s y NSPT (Tomado de Kirar, 2016)

| Autores | Todos los suelos | Arena | Arcilla |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Hanumantharao and Ramana | $V_s = 82.6N^{0.430}$ | $V_s = 79.0N^{0.434}$ | |
| Ohba and Toriumi | $V_s = 84N^{0.310}$ | | |
| Imai | $V_s = 91N^{0.340}$ | $V_s = 80.6N^{0.331}$ | $V_s = 80.2N^{0.292}$ |
| Seed and Idriss | $V_s = 61N^{0.500}$ | | |
| Este estudio | | | $V_s = 120N^{0.430}$ |

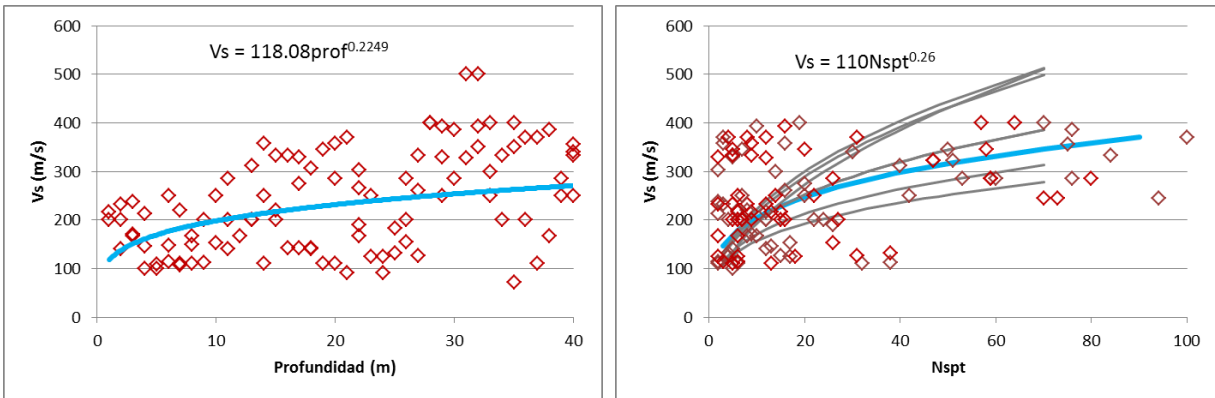


Figura 6. Correlación entre Vs y profundidad (Izquierda). Correlación entre Vs y Nspt (Derecha).

La combinación de las líneas sísmicas realizadas, con las mediciones HVSR permitió obtener los perfiles de velocidad de ondas de corte hasta la roca en los diez sitios estudiados, lo cual al complementarse con la información previa de los 17 estudios realizados por JEOPROBE SAS (2018), dieron lugar a la construcción del perfil longitudinal de velocidad de ondas de corte entre Usaquén y Tibitoc (Figura 7).

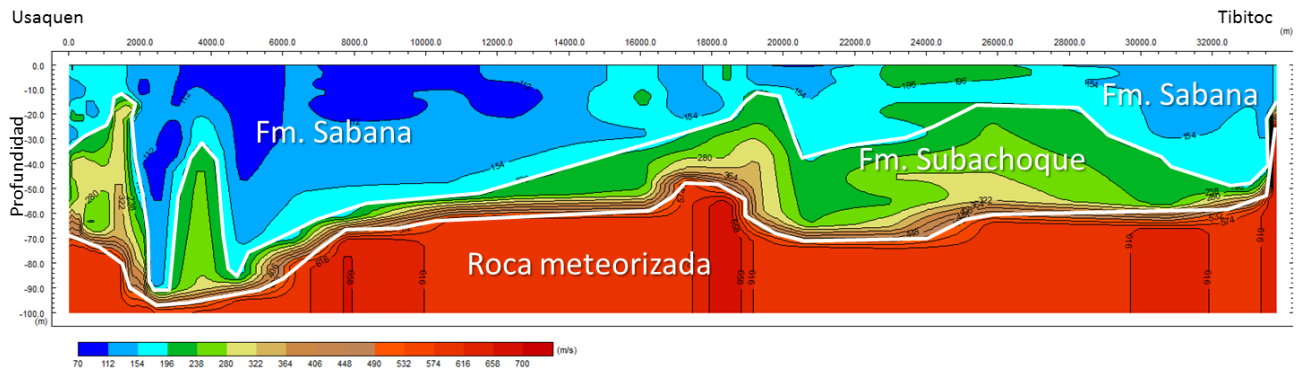


Figura 7. Perfil de Vs entre Usaquén y Tibitoc (Escala vertical exagerada).

5. Conclusiones

Se realizó una recopilación de 17 estudios geotécnicos en una franja de 33 kilómetros comprendida entre la localidad de Usaquén y Tibitoc, a fin de determinar el perfil de velocidades en función de la profundidad y algunos parámetros geotécnicos de interés para el diseño de estructuras sismo-resistentes. En vista de que la información disponible no superaba los primeros

50 metros de profundidad, se realizó una campaña de investigación geofísica en 10 puntos distribuidos a lo largo de la franja, la cual consistió en la realización de líneas sísmicas bajo la técnica de dispersión de ondas superficiales, mediciones ambientales HVSR y arreglos de ruido ambiental 2D aplicando la técnica del SPAC.

Los resultados de la geofísica permitieron detectar una primera capa con velocidades de onda de corte promedio entre 110 y 140 m/s que se extiende desde superficie y hasta una profundidad que varía entre 10 y 70 metros dependiendo de la abscisa, asociada con las arcillas blandas de la Formación Sabana. Posterior a dicha capa de arcillas blandas, se observa un estrato con velocidades promedio de 180 y 250 m/s, el cual se asocia a materiales limosos y arenosos de origen aluvial-coluvial de la Formación Subachoque y que se extienden hasta el contacto con la roca meteorizada, el cual se encuentra a profundidades que varían entre 40 y 90 metros. La interpretación estratigráfica de los perfiles de velocidad fue corroborada con los sondeos geotécnicos en los sitios donde se tenían ambas informaciones y cotejada con la geología de la zona, observándose una correspondencia precisa. Se establecieron diversas correlaciones con parámetros geotécnicos que pueden ser útiles en la definición de una campaña geotécnica de detalle, o como insumo para la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá.

6. Referencias Bibliográficas

- Ingeominas (1997). “**Microzonificación sísmica de Santa Fé de Bogotá**”. Publicaciones Ingeominas; Santa Fé de Bogota; Ministerio de Minas y Energía.
- Jeoprobe (2018). “**Análisis de vulnerabilidad sísmica de la línea Tibitoc - Usaquen**”. RO4-1-AM-0605-01, Bogotá, Colombia
- Kirar B. et al (2016). “**Correlation Between Shear Wave Velocity (Vs) and SPT Resistance (N) for Roorkee Region**”, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering.
- Rodríguez J.A. et al (2002). “**Parámetros geomecánicos de las arcillas superficiales de la sabana de Bogotá**”. IV seminario colombiano de geotecnia IX congreso colombiano de geotecnia.
- Rodríguez J.A. (2005). “**Comportamiento Dinámico de Suelos Blandos de Bogotá**”. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas.
- Rodríguez J.A. (2019). “**Determinación de perfiles de velocidad de ondas en la ciudad de Bogotá, a partir de registros acelerográficos y mediciones de ruido ambiental**”. IX Congreso nacional de ingeniería sísmica, Cali, Colombia.