

# Caracterización Geomecánica, mediante Ensayos en Campo, de Arcillas Lacustres Sobreconsolidadas del Occidente de la Sabana de Bogotá (Colombia)

Camila Andrea Barbosa Hernández, IC(c)<sup>1</sup>, Edwin Fabián Casas Segura, IC(c)<sup>2</sup>,

Jorge Arturo Pineda Jaimes, PhD<sup>3</sup>, José Andrés Cruz Wilches, PhD(c)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Santo Tomás, Colombia, camilabarbosa@usantotomas.edu.co, <sup>2</sup>Universidad Santo Tomás, Colombia, edwincasas@usantotomas.edu.co, <sup>3</sup>Universidad Santo Tomás & Universidad Nacional de Colombia, jorgepineda@usantotomas.edu.co, jpinedaj@unal.edu.co, <sup>4</sup>Universidad Santo Tomás, Colombia, josecruz@usantotomas.edu.co.

**Resumen**—En la vía entre Siberia y Tenjo (Cundinamarca, Colombia) se pueden encontrar arcillas sobreconsolidadas que tienen problemas de desecación y contracción volumétrica, lo que genera múltiples patologías como hundimientos y asentamientos en obras civiles. A continuación, se presentan los resultados de diferentes ensayos de campo realizados para establecer algunas propiedades de resistencia y rigidez in situ, y su distribución con la profundidad. Dentro de los ensayos realizados se tienen los resultados obtenidos durante los ensayos SPT (Standard Penetration Test), FVT (Field vane test) y Ensayo de refracción sísmica (Seismic Refraction Test), tomados en dos puntos cercanos a la carretera mencionada, y se contrastan los resultados con otros sondeos previos realizados en la zona en 2014.

**Palabras claves**—Arcillas sobreconsolidadas, desecación, contracción volumétrica, SPT, FVT, Refracción sísmica

**Abstract**— In the road between Siberia and Tenjo (Cundinamarca, Colombia) it is possible to find over-consolidated clays that have problems of desiccation and volumetric contraction, which generates multiple pathologies in roads and light structures, with the subsequent decrease in the service level. This paper shows the initial results of in situ characterization of these materials, the variations of properties of strength and stiffness estimated through field tests such as SPT (Standard Penetration Test), FVT (Field vane test) and Seismic Refraction Test. The results from those tests, executed in order to establish the influence from stress history in mechanical properties of the superficial part from the lacustrine clays to pose simulation models that allows a more rational analysis of deterioration problems in the structures in this area.

**Keywords**—Over-consolidated clays, dewatering, volumetric contraction, SPT, Vane test, Seismic Refraction test

## I. INTRODUCCIÓN

La vía Siberia-Tenjo se localiza al sur del Altiplano Cundi-Boyacence, sobre la Cordillera Oriental de Colombia, a una altura aproximada de 2600 msnm [1]; al Occidente de la ciudad de Bogotá (ver Figura 1), sobre la Formación Sabana, comprendida por sedimentos lacustrinos de origen cuaternario.

El perfil estratigráfico promedio se encuentra constituido principalmente por arcillas sobreconsolidadas en superficie y normalmente consolidadas en profundidad [4]; con

intercalaciones de arcilla orgánica, turba/lignita, arcillas arenosas y arenas arcillosas. Este perfil estratigráfico fue establecido a partir de cuatro (4) sondeos con recuperación de muestras, que fueron realizados en la zona de estudio y que alcanzaron profundidades de hasta 20m bajo la superficie actual del terreno, como se muestra en la Tabla 1.

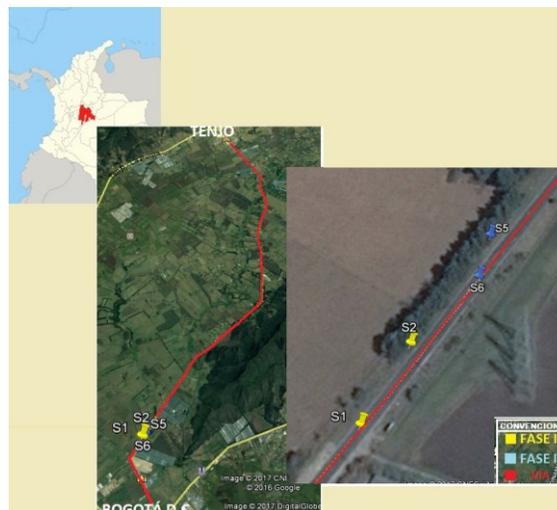


Figura 1, Localización de los Sondeos “FASE I, Sondeo 1 y Sondeo 2”; FASE II, Sondeo 5 y Sondeo 6”. Vía Siberia - Tenjo (Cundinamarca, Colombia). (Google Maps, 2016).

Tabla 1  
Sondeos (coordenadas y profundidades)

FASE I			
Sondeo	Coordenadas		Profundidad (m)
1	N 4° 46' 47"	W 74°09'33"	20
2	N4° 46' 47"	W 74°09'33"	20
FASE II			
Sondeo	Coordenadas		Profundidad (m)
5	N 4°46'49.3"	W 74°09'31.4"	15
6	N 4°46'49.3"	W 74°09'31.4"	15

Teniendo en cuenta los problemas de desecación presentes a lo largo de la vía Siberia – Tenjo, se puede evidenciar el

deterioro de la vía debido a las diferentes patologías que presenta (ver Figura 2-A). Es así como se procede a realizar un diagrama de las mismas, fisuras longitudinales (FL), hundimientos (HUN), (ver Figura 2-B), asociadas a la pérdida de humedad y los cambios volumétricos presentes en suelos arcillosos de alta compresibilidad en el sector [2].

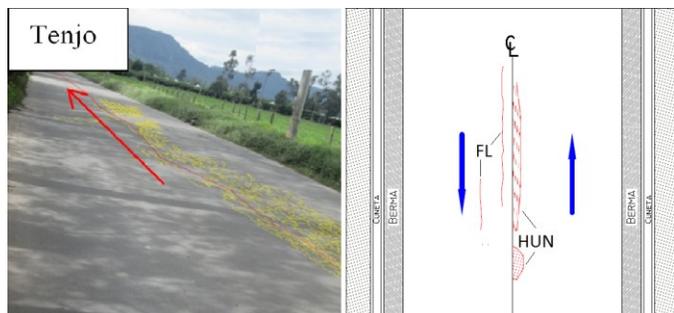


Figura 2, Patologías presentes en la vía: Fisuras longitudinales (FL), hundimientos (HUN).

A continuación, se presentarán los resultados preliminares de la caracterización geomecánica mediante ensayos *in situ*, para establecer propiedades de resistencia y rigidez de estos materiales, teniendo en cuenta que el objeto de estudio busca evaluar las propiedades mecánicas del subsuelo bajo condiciones de desecación y el estado de sobreconsolidación.

Se realizó una recolección de datos por medio de ensayos en campo que permitieron determinar el comportamiento y las propiedades mecánicas de este tipo de suelos, realizando a su vez, una comparación de la variación de los parámetros obtenidos con respecto a los hallados con anterioridad, Fase I [8].; este tipo de ensayos otorgan resultados en el momento en que el suelo se encuentra sin ningún tipo de alteración, por lo cual sus resultados serán más fiables y cercanos a la realidad, sin embargo, es frecuente que se complementen los resultados, con los obtenidos ensayando muestras en laboratorio, para una interpretación más detallada. [3] y [5].

Los resultados se encuentran relacionados con los ensayos: Ensayo de Penetración Estándar (SPT), Ensayo de Veleta (FVT) y Refracción sísmica, los cuales, se utilizaron para establecer parámetros de resistencia del suelo en términos de esfuerzos totales y efectivos, y módulos de elasticidad, entre otros. Estos resultados son importantes para, el planteamiento de un modelo numérico de simulación que permita predecir el comportamiento de una vía, que se apoya sobre una subrasante fisurada.

## II. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis del ensayo SPT, se tuvo en cuenta la literatura (fórmulas de correlación, gráficas y tablas existentes) y los antecedentes de la zona de estudio [1], con lo cual se procedió a comparar las variaciones en las características generales. Con el ensayo SPT se obtuvo los

valores de la resistencia a la penetración, y así se determinó (implementando correlaciones) con el número de golpes  $N$  (golpes/pie) en campo, el ángulo de fricción ( $\phi$ ), la resistencia al corte no drenada ( $s_u$ ), módulos de elasticidad ( $E_s$ ) [3].

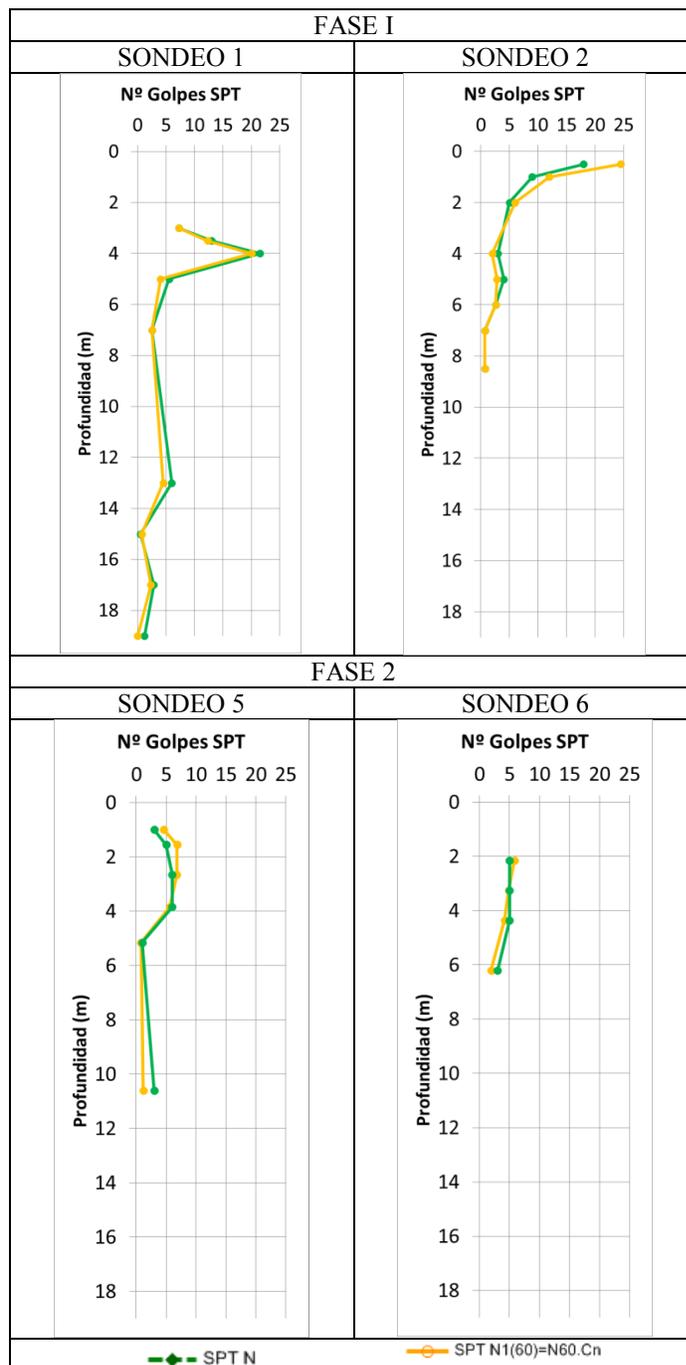


Figura 3, Paralelo de la Corrección SPT N60 vs Profundidad.

La Figura 3, muestra una clara variación de los efectos de la desecación presente en la zona y su relación con la pérdida de humedad con respecto a la profundidad de las muestras obtenidas; es así como se le atribuye la variación en los

diagramas de la FASE I (Sondeo 1) y la FASE II (Sondeo 6) a la misma; Evidenciando en el sondeo 1, una humedad alta y una pérdida de la misma de manera continua, mientras que en el Sondeo 6, presenta un comportamiento contrario en los primeros 5 m, lo cual indica grandes cambios por contracción volumétrica en las arcillas presentes del sector. Así mismo, los diagramas de los SONDEOS 2 y 5, presentan un comportamiento muy similar al anteriormente descrito, con la diferencia que los grandes cambios por contracción volumétrica se presentaron en la FASE I [4]; esta variación no se encuentra directamente relacionada con las especies vegetales, aclarando que, la incidencia de la presencia de especies foráneas se atribuye como un agravante adicional y potencial a los procesos de desecación [1].

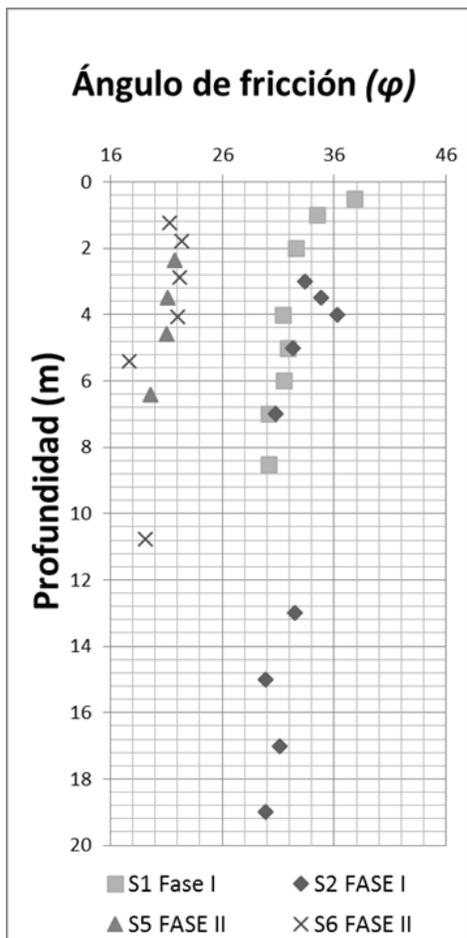


Figura 4, Variación del ángulo de resistencia no drenado, ensayo SPT.

Así mismo, en la Figura 4, se evidencia una concordancia con el análisis realizado al número de golpes. Para los resultados de las fases I (Sondeo 1) y II (Sondeo 5), se puede observar como el Angulo de fricción de resistencia al corte no drenado ( $\phi$ ), tiene tendencia a disminuir a medida que aumenta la profundidad, hasta que finalmente alrededor de los 9m para el Sondeo 1 y los 7m para el Sondeo 5 se dejan de obtener valores correspondientes a este. Para la FASE I

(Sondeo 2) en los primeros 2m y FASE II (Sondeo 6) en los primeros 4m, el Angulo de fricción de resistencia al corte no drenado ( $\phi$ ) tiende a aumentar en sus valores, derivados de suelos aparentemente de mayor consistencia y con mayor resistencia, desde estas profundidades respectivamente estos valores disminuyen, sin tender a disminuir a medida que aumenta la profundidad, al contrario, presentan valores con ligeras variaciones entre ellos; El valor que presentan los Ángulos de fricción de resistencia al corte no drenado ( $\phi$ ) en los primeros metros de cada sondeo (FASE I (Sondeo 2) primeros 2m, FASE II (Sondeo 6) primeros 4m) y que presentan mayor valor, son el reflejo de la desecación que presenta el terreno, presentando así suelos que de acuerdo a su bajo valor de humedad genera esta alta resistencia al corte no drenado, por lo cual se entiende el número de golpes necesarios para la extracción de muestra a estas profundidades.

De esta manera se corrobora la información presentada en la FASE I [8], en donde el Angulo de resistencia al corte no drenado ( $\phi$ ) disminuye a medida que aumenta la humedad, de la misma manera que la rigidez del suelo disminuye con respecto a la profundidad.

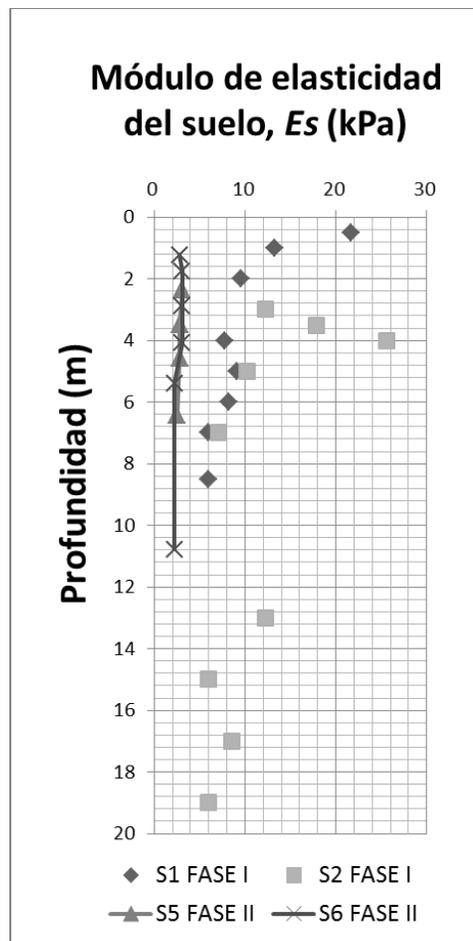


Figura 5, Variación del módulo de elasticidad, ensayo SPT.

Por otro lado, la Figura 5, presenta las variaciones en el módulo de elasticidad, donde en la FASE I (Sondeo 1) y FASE II (Sondeo 5), se presenta un comportamiento similar, disminuyendo el Módulo de elasticidad ( $E_s$ ) a medida que aumenta la profundidad. La FASE I (Sondeo 2) y FASE II (Sondeo 6), mantienen una tendencia contraria con grandes variaciones que se reflejaran en las presiones que soporta el suelo.

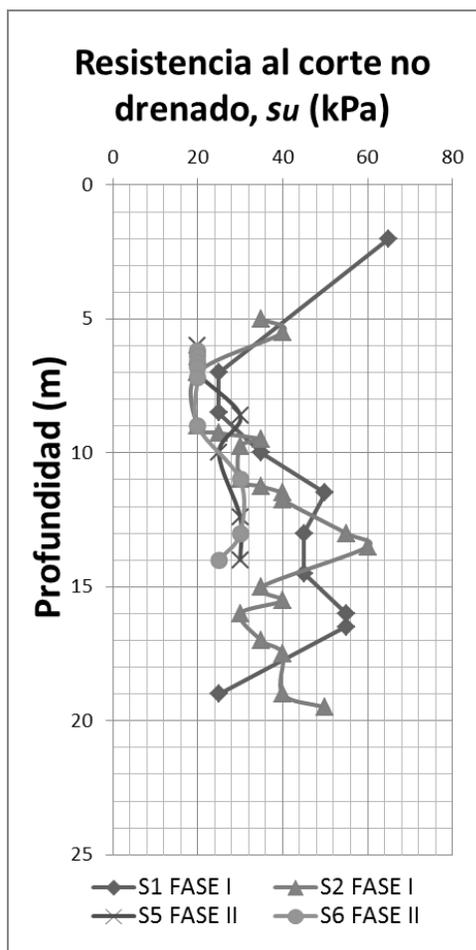


Figura 6, Variación de la resistencia al corte no drenada ( $s_u$ ), en campo por medio del ensayo FVT.

Por otra parte, los valores de resistencia al corte presentado en la FASE I, son ligeramente más grandes a los determinados en la FASE II, esto se debe a que en el transcurso de los dos años se han presentado cambios de contracción volumétrica, provocando inestabilidad en los estratos probablemente por fisuración (Ver Figura 6).

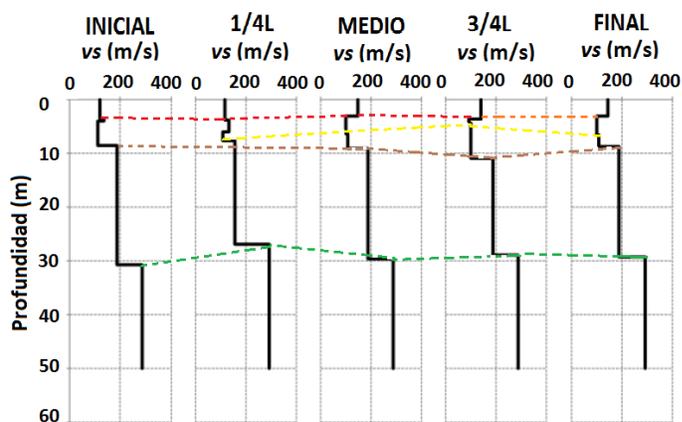


Figura 7, Líneas de refracción Sísmica, Ref. [8]

En la Figura 7, se presentan las variaciones de la velocidad de onda ( $v_s$ ), con respecto a la profundidad, clasificando según el valor de la velocidad de onda de corte ( $v_s$ ) [6]. Se puede observar, que el suelo a lo largo de los primeros 5m de profundidad, presenta un intervalo de velocidad de onda ( $v_s$ ), entre valores cercanos a los 100 m/s, velocidad que caracteriza materiales de capa vegetal, escombros o rellenos, y un suelo limo - arcilloso de origen aluvial de depósitos recientes, posteriormente, se evidencia un cambio de velocidad cercano a los 90 m/s, presumiendo la existencia de un lente o capa delgada de materia orgánica. Alrededor de los 9m, se observa una velocidad de onda de corte cercana a los 200 m/s, este material, se asocia a las arcillas blandas de origen lacustre de la Formación Sabana de mayor consistencia que la capa anterior con un espesor estimado 5m; por último, desde los 30m de profundidad a una velocidad se presenta una velocidad de 400 m/s, esto se asocia a las arcillas firmes de la Formación Sabana. Los primeros 30m de profundidad de investigación con un rango de velocidad inferior a 180 m/s, se definen como un suelo tipo E, según la norma NSR10.

El principal factor que puede generar este cambio de velocidad de onda ( $v_s$ ) a lo largo de la profundidad se debe a las fisuras generadas por los efectos de desecación los cuales hacen disminuir el valor de la onda de corte. La zona más cercana a la superficie es aquellas que presentan una mayor desecación por la vegetación presente en los costados de la vía, lo que genera que la onda encuentre más resistencia al propagarse que en profundidades mayores ya que hay menos continuidad.

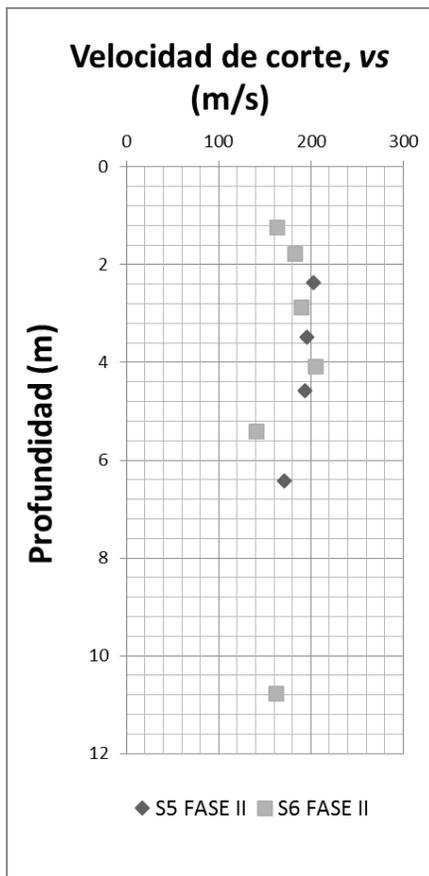


Figura 8, Variación de la velocidad de corte con la profundidad, ensayo SPT.

En la Figura 8, se puede observar que en la FASE II, los sondeos 6 y 5 también presentan un cambio de velocidad a los 5m, según el Ensayo de Penetración Estándar (SPT), al contrario, con la FASE I, esta velocidad excede los 180 m/s,

## II. CONCLUSIONES

Los parámetros obtenidos y las constantes elásticas determinadas y contrastadas, de la FASE I (Sondeo 1 y 2, realizados en el año 2014) y FASE II (Sondeos 5 y 6, realizados en el año 2016), presentan valores con tendencias consistente a lo encontrado en la literatura para arcillas de la Sabana de Bogotá [ 9]. Del mismo modo, y teniendo en cuenta la variación y cambios drásticos de los parámetros en los primeros metros de los ensayos, se interpreta que la variación está directamente relacionada con la presencia de desecación en los primeros 6m del perfil, y está a su vez se encuentra relacionada con la presencia de vegetación foránea a los costados de la vía.

Las perforaciones que se encuentran cerca a la vegetación (Sondeo 1 y 5), presentan un incremento en la resistencia a la penetración en los primeros 5m; con una disminución progresiva con el aumento de la profundidad, en los estratos

posteriores; teniendo en cuenta que el comportamiento de la resistencia a la penetración de las perforaciones (Sondeo 2 y 6), presenta esta última tendencia; se realizó la verificación del comportamiento del material obtenido, por medio del análisis de la resistencia al corte obtenida con el ensayo de veleta y el análisis de la velocidad de ondas de corte obtenido con las líneas sísmicas.

Los resultados, contribuyen al análisis geomecánico de las arcillas del Occidente de la Sabana de Bogotá y así poder resaltar valores de parámetros de resistencia y elásticos presentes en el sector estudiado.

Teniendo en cuenta los resultados de las Líneas de Refracción Sísmica, se obtiene que: Las velocidades de corte ( $v_s$ ) presentes en los primeros 10m generan valores cercanos a 100 m/s, de ahí en adelante el valor de estas fue aumentando proporcionalmente con la profundidad, obteniendo valores de velocidad de onda ( $v_s$ ) cercanos a 200 m/s en profundidades de 10 a 30m y valores cercanos a 300 m/s de 30m en adelante, indicando la presencia de suelos más rígidos a mayor profundidad, estos valores de velocidad de onda ( $v_s$ ) dan como resultado la clasificación del suelo como Arcilla del tipo lacustre. Los valores de onda para este tipo de suelos en el sector, presentan esta variación debido a la humedad presente en el terreno, la cual, aumenta proporcionalmente con la profundidad, generando una facilidad en el medido para que la onda pueda tener mayor velocidad en su dispersión, de esta manera se deduce que los valores presentes de humedad más bajos están en profundidades de 0 hasta casi 10m, estos valores reflejan el impacto de la desecación presente en el terreno, ya que este a causa de los cambios climáticos, la vegetación y sus raíces presentes a los costados de la vía, generan estos bajos niveles de humedad y respectivamente las bajas velocidades de onda ( $v_s$ ), por lo cual se puede concluir que la desecación es la directa implicada en la baja resistencia de los suelos y a raíz de esto la problemática que se presentan en la vía.

Con los resultados de las pruebas realizadas se evidencia que las arcillas presentan cambios constantes por contracción volumétrica, provocando inestabilidad en los estratos, encontrándose valores de cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción ( $\phi$ ), bajos. Estas dos características permiten obtener, bajas, resistencias al corte no drenadas ( $s_u$ ), y presentan bajos valores de velocidades para las ondas ( $v_s$ ), propios de materiales como arcillas expansivas, esta característica dificulta la construcción de vías apoyadas sobre subrasantes cuya estratificación este compuesta por las mismas; pero conociendo el suelo se pueda dar mejor tratamiento para su estabilización.

## III. REFERENCIAS

- [1] S. Rivera Pardo, y L. Rojas Perilla, “Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la Sabana de Bogotá,”

- Bogotá. 140 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Santo Tomás. Facultad de ingeniería civil, 2014.
- [2] UNAL AND MINTRANSPORTE, "Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles," Bogotá. INVIAS, 2006.
- [3] A. Gonzales, "Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT," X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana, 1999.
- [4] J. Pineda Jaimes, y J. Colmenares, "Influence of desiccation on volumetric behavior of Bogota Clay," Proceedings of XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Editors: Sociedad Venezolana de Geotecnia, 2006.
- [5] A. Sarria Molina, "Métodos Geofísicos con Aplicaciones a la Ingeniería Civil" En: Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil. Bogotá. Ediciones Uniandes ISBN: 34 TIO. p-26, 1996.
- [6] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, "Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-10". Bogotá, Colombia. AIS, 2010.
- [7] D. Arias Montañez, "Determinación del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo ( $K_0$ ), para una arcilla superficial del occidente de la sabana de Bogotá D.C.,) Bogotá 210 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Santo Tomas. Facultad de ingeniería civil, 2015.
- [8] S. Rivera Pardo, y L. Rojas Perilla, "Caracterización de suelos arcillosos desecados al occidente de la sabana de Bogotá," Bogotá. 140 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Santo Tomás. Facultad de ingeniería civil, 2014.
- [9] INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI, "Plioceno y Cuaternario del Altiplano de Bogotá y alrededores," 102p. Análisis geográficos. Subdirección de geografía. Instituto geográfico Agustín Codazzi, 1995.